



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGURANGAN INSIDEN ENERGI *ARC FLASH* DENGAN
MENGUNAKAN METODE *ZONE SELECTIVE*
INTERLOCKING PADA PT. PETROCHINA**

**Muhammad Shahrizal Erlangga
NRP 2212 106 011**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Teguh Yuwono**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TE 141599

**ARC FLASH INCIDENT ENERGY REDUCTION USING
ZONE SELECTIVE INTERLOCKING AT
PT. PETROCHINA**

**Muhammad Shahrizal Erlangga
NRP 2212 106 011**

**Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Teguh Yuwono**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015**

**PENGURANGAN INSIDEN ENERGI *ARC FLASH*
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *ZONE*
SELECTIVE INTERLOCKING PADA
PT. PETROCHINA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

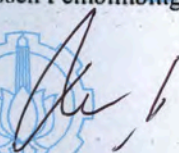
Pada


Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,


Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP. 196603181990101001


Ir. Teguh Yuwono
NIP. 195008061976121002



PENGURANGAN INSIDEN ENERGI *ARC FLASH* DENGAN MENGGUNAKAN METODE *ZONE SELECTIVE INTERLOCKING* PADA *PT. PETROCHINA*

Nama : Muhammad Shahrizal Erlangga
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Ir. Teguh Yuwono

ABSTRAK

Arc Flash yang terjadi pada sistem kelistrikan menimbulkan kerugian yang sangat besar. Insiden energi yang dilepaskan dapat merusak peralatan dan terutama dapat membahayakan pekerja yang bekerja di lingkungan tersebut. Perlu sistem pengaman yang mampu mengatasi gangguan tersebut. Koordinasi pengaman yang selektif tentu akan mempertimbangkan jarak waktu antar pengaman untuk menjaga kontinuitas serta stabilitas aliran daya ke lokasi yang tidak mengalami gangguan. Permasalahan yang timbul adalah hal tersebut mengakibatkan pengamanan dari *Arc Flash* belum efektif dalam mengurangi bahaya *Arc Flash*. Sesuai dengan standar koordinasi proteksi, pengaman yang semakin jauh dari beban *setting* waktunya akan diset relatif lebih lama untuk menjaga selektifitas. Hal tersebut mengakibatkan insiden energi *Arc Flash* akan besar. *Zone Selective Interlocking* sebagai sebuah metode yang bekerja berdasarkan komunikasi antar pengaman menjadi solusi yang sesuai dengan permasalahan tersebut. ZSI dapat mengurangi insiden energi *Arc Flash* tanpa mengorbankan selektifitas dari koordinasi pengaman sehingga kontinuitas daya tetap terjaga. Penerapan teknik ZSI ini akan coba diterapkan pada sistem tegangan rendah 0.48 kV CPA Petrochina mengingat pentingnya perusahaan tersebut mengamankan peralatan serta pekerjaanya dari insiden energi *Arc Flash* yang besar.

Kata Kunci : *Arc Flash*, Busur Api, Gangguan, *Zone Selective Interlocking*,

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

ARC FLASH INCIDENT ENERGY REDUCTION USING ZONE SELECTIVE INTERLOCKING AT PT. PETROCHINA

Name : Muhammad Shahrizal Erlangga
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Advisor II : Ir. Teguh Yuwono

ABSTRACT

Arc flash that occurs on the electrical system causing huge losses. Incident energy released can damage equipment and endanger workers employed in these environments. We need a protection system that is able to cope with the disorder. Selective coordination of protection which will consider the intervals between the protective device to maintain the continuity and stability of the power flow is not susceptible to interference. The problem that arises is that system is not effective in reducing the impact of arc flash hazards. In accordance with the standards, the low voltage protective device away from the load will set a relatively long disruptions to maintain selectivity, but its impact is arc flash incident energy will be higher. Zone Selective Interlocking as a method based on the communication between protective device give solutions that fit the problem. ZSI can reduce Arc Flash incident energy without sacrificing selectivity of protection coordination so that the continuity of power is still safe. So we try apply this ZSI to the low voltage system 0,48 kV CPA Petrochina to give secure for workers and the equipment from high Arc Flash incident energy.

Keywords : *Arc Flash, Arcing Current, Protection, Selective Coordination, Zone Selective Interlocking*

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia yang tak terhingga berupa kesabaran, ketegaran, dan kekuatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulisan Tugas Akhir ini salah satunya bertujuan untuk memenuhi syarat untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa dalam penyusunan Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kepada Ayah dan Mama tercinta, Yangti, Kakak dan Adek-adek tersayang serta segenap keluarga lainnya yang tinggal di Surabaya yang tak putus-putusnya memberikan semangat, mendoakan serta memberikan dukungan untuk keberhasilan ananda.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya.
3. Syfa Almira perempuan yang telah banyak berjasa dalam memberikan semangat, dukungan, serta doa kepada penulis.
4. Seluruh rekan Lintas Jalur-2012 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama 2 tahun ini. Terima kasih.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, dan teman-teman lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan Tugas Akhir.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan.....	1
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Manfaat.....	4
 BAB 2 ARC FLASH DAN METODE ZSI	
2.1 Definisi <i>Arc Flash</i>	5
2.2 Perhitungan Energi <i>Arc Flash</i> Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 [3]	6
2.3 Batas Jarak Perlindungan <i>Arc Flash</i>	9
2.4 Personal Protective Equipment (PPE)	11
2.5 Gangguan Pada Sistem Kelistrikan	14
2.6 Definisi <i>Zone Selective Interlocking (ZSI)</i>	16
 BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PLANT CPA JOB P-PEJ TUBAN	
3.1 Sistem Kelistrikan JOB P-PEJ (Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java), Tuban.....	21
3.2 Data Kelistrikan JOB P-PEJ Tuban	23
3.2.1 Rating Tegangan.....	23
3.2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik JOB P-PEJ, Tuban	23
3.2.3 Data Beban JOB P-PEJ.....	24
 BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA	
4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan.....	29

4.2	Pengaturan Pengaman Arus Lebih	31
4.3	Simulasi Koordinasi Pengaman Kondisi Eksisting	32
4.3.1	Simulasi pada Tipikal 1a	32
4.3.2	Simulasi pada Tipikal 1b	36
4.3.3	Simulasi pada Tipikal 2	37
4.4	Simulasi Koordinasi Pengaman dan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Resetting</i>	40
4.4.1	Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> pada Tipikal 1	40
4.4.2	Perhitungan Manual Insiden Energi Arc Flash Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 1	46
4.4.3	Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> pada Tipikal 2	50
4.4.4	Perhitungan Manual Insiden Energi Arc Flash Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 2	56
4.5	Simulasi Pengurangan Incident Energy Arc Flash dengan Teknik <i>Zone Selective Interlocking</i>	60
4.5.1	Simulasi Pengurangan Insiden Energi Arc Flash dengan Teknik <i>Zone Selective Interlocking</i> pada Tipikal 1	60
4.5.2	Perhitungan Manual Insiden Energi Arc Flash setelah penerapan Teknik ZSI pada Tipikal 1	70
4.5.3	Simulasi Pengurangan Insiden Energi Arc Flash dengan Teknik ZSI pada Tipikal 2	75
4.5.4	Perhitungan Manual Insiden Energi Arc Flash setelah penerapan Teknik ZSI pada Tipikal 2	83
4.6	Perbandingan Insiden Energi Arc Flash Resetting dan ZSI	87

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	89
5.2	Saran	90

DAFTAR PUSTAKA.....91

LAMPIRAN

RIWAYAT PENULIS

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1	Faktor Untuk Peralatan dan Kelas Tegangan 8
Tabel 2.2	<i>Typical Bus Gaps</i> 9
Tabel 2.3	<i>Typical Working Distance</i> 9
Tabel 2.4	Kategori <i>Personal Protective Equipment</i> 12
Tabel 2.5	<i>Personal Protective Equipment</i> Untuk Kategori 1 12
Tabel 2.6	<i>Personal Protective Equipment</i> Untuk Kategori 2 12
Tabel 2.7	<i>Personal Protective Equipment</i> Untuk Kategori 3 dan 4. 13
Tabel 2.8	<i>Summary of Protective Clothing Categories (From Table</i> 130.7(C) <i>of NFPA 70E 2004) [6]</i> 13
Tabel 3.1	Data Generator pada JOB P-PE 21
Tabel 3.2	Transformator Daya Penyuplai Beban 24
Tabel 3.3	Data Beban MCC pada sistem JOB P-PEJ 24
Tabel 4.1	Data Arus Hubung Singkat di MCC 5 32
Tabel 4.2	Data Arus Hubung Singkat di MCC 1-2 feeder 4 32
Tabel 4.3	Data Eksisting CB di MCC 5 33
Tabel 4.4	Data Eksisting CB di MCC 1-2 Feeder 4 38
Tabel 4.5	Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> 45
Tabel 4.6	Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Tipikal 2 <i>Resetting</i> 56
Tabel 4.7	Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Tipikal 1 Teknik ZSI 70
Tabel 4.8	Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> MCC 1-2 Feeder 4 dengan Teknik ZSI pada <i>Easy Power</i> 83
Tabel 4.9	Perbandingan <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> dan ZSI MCC 5 87
Tabel 4.10	Perbandingan <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> dan ZSI MCC1-2 88

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Contoh <i>Arc Flash</i> 6
Gambar 2.2	Ilustrasi Batas Perlindungan Terhadap Bahaya <i>Arc flash</i> [1] 10
Gambar 2.3	Contoh Perlengkapan Keselamatan 11
Gambar 2.4	Ilustrasi Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori [2] 14
Gambar 2.5	Skema Metode ZSI 17
Gambar 2.6	Fitur ZSI di LVCB pada <i>Software Easy Power</i> 19
Gambar 3.1	<i>Single Line Diagram</i> pada Sistem Kelistrikan <i>Plant CPA JOB P- PEJ Tuban</i> 22
Gambar 3.2	Lokasi Tipikal Untuk Simulasi ZSI 28
Gambar 4.1	<i>Single Line Diagram</i> JOB P-PEJ 29
Gambar 4.2	Tipikal 1 MCC 5 30
Gambar 4.3	Tipikal 2 MCC1-2 Feeder 4 31
Gambar 4.4	Sistem Pengaman JOB P-PEJ Tipikal 1a 33
Gambar 4.5	Kurva Koordinasi Sistem Pengaman Tipikal 1a 35
Gambar 4.6	Sistem Pengaman JOB P-PEJ Tipikal 1b 36
Gambar 4.7	Kurva Koordinasi Sistem Pengaman Tipikal 1b 37
Gambar 4.8	Sistem Pengaman JOB P-PEJ Tipikal 2 38
Gambar 4.9	Kurva Koordinasi JOB P-PEJ Tipikal 2 39
Gambar 4.10	Kurva Koordinasi <i>Resetting</i> Tipikal 1a 44
Gambar 4.11	Kurva Koordinasi <i>Resetting</i> Tipikal 1b 45
Gambar 4.12	Kurva Koordinasi <i>Resetting</i> Tipikal 2a 54
Gambar 4.13	Kurva Koordinasi <i>Resetting</i> Tipikal 2b 55
Gambar 4.14	<i>Single Line Diagram</i> MCC 5 pada <i>Easy Power</i> 60
Gambar 4.15	Fitur ZSI pada <i>Software Easy Power</i> 61
Gambar 4.16	Gangguan pada Kondisi 1 62
Gambar 4.17	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 1 63
Gambar 4.18	Gangguan pada Kondisi 2 64
Gambar 4.19	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 2 65
Gambar 4.20	Gangguan pada Kondisi 3 66
Gambar 4.21	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 3... 67

Gambar 4.22	Gangguan pada Kondisi 4	68
Gambar 4.23	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 4 ...	69
Gambar 4.24	<i>Single Line Diagram</i> MCC 1-2 feeder 4 pada <i>Easy Power</i>	75
Gambar 4.25	Gangguan pada Kondisi 1	76
Gambar 4.26	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 1 ...	77
Gambar 4.27	Gangguan pada Kondisi 2	78
Gambar 4.28	TCC Generator saat Gangguan Kondisi 2	79
Gambar 4.29	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 2 ...	80
Gambar 4.30	Gangguan pada Kondisi 3	81
Gambar 4.31	TCC pada <i>Easy Power</i> saat Gangguan Kondisi 3 ...	82

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Plant CPA JOB P-PEJ (Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java), Tuban sebagai plant perusahaan yang bergerak di bidang minyak dan gas tentu sangat mempertimbangkan keselamatan dari pekerja-pekerjanya. Terutama jika menyangkut masalah *Arc Flash* yang sangat berbahaya bagi keselamatan pekerja. *Arc Flash* merupakan total energi yang dilepaskan ketika terjadi gangguan hubung singkat pada sistem. Energi tersebut akan dilepaskan melalui udara mengalir ke fasa lain, netral atau mengalir ke tanah. Ketika pekerja yang tidak dilengkapi alat pelindung diri berada di dekat dengan *Arc Flash*, maka akan menyebabkan cedera serius dan bahkan kematian. *Arc Flash* sendiri bisa terjadi kapan saja saat terjadi gangguan hubung singkat sehingga diharapkan pekerja selalu waspada dan sigap dengan cara memakai alat pelindung diri sesuai kategori *Arc Flash* yang ada. Selain berdampak pada pekerja, *Arc Flash* sendiri juga dapat berdampak pada rusaknya peralatan sistem tenaga listrik.

Melihat bahaya serta kerugian dari *Arc Flash* yang begitu besar, maka diperlukan suatu teknik atau metode untuk mengurangi energi insiden yang dilepaskan oleh *Arc Flash*. Sehingga dengan berkurangnya energi yang dilepas maka bahaya yang ditimbulkan pun berkurang. Salah satu teknik yang mampu mengurangi insiden energi dari *Arc Flash* pada tegangan rendah adalah teknik *Zone Selective Interlocking*. Teknik ini mengacu pada prinsip semakin cepat *arcing fault current* dihilangkan maka semakin kecil incident energy yang dilepaskan. Dari penerapan teknik *Zone Selective Interlocking* ini pada *Plant* CPA JOB P-PEJ diharapkan insiden energi *Arc Flash* yang terjadi berkurang hingga mencapai kategori yang rendah dengan alat pelindung diri yang sesuai standar.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana koordinasi pengaman yang selektif dan efektif untuk mengurangi insiden energi *Arc Flash*
2. Seberapa besar insiden energi *Arc Flash* yang terjadi sebelum penerapan teknik ZSI pada tegangan rendah 0.48 kV

3. Bagaimana penerapan teknik *Zone Selective Interlocking* pada sistem agar dapat mengurangi insiden energi
4. Besar pengurangan insiden energi *Arc Flash*

1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisis sistem kelistrikan *Plant* CPA JOB P-PEJ
2. Mengetahui seberapa besar insiden energi *Arc Flash* yang terjadi
3. Mengetahui penerapan metode ZSI pada sistem kelistrikan
4. Mengurangi insiden energi *Arc Flash* dengan metode ZSI

1.4 Metodologi

Metode yang akan dilakukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data dan Studi Literatur
Hal yang dilakukan pertama kali adalah mengumpulkan data dari eksisting peralatan yang ada di JOB P-PEJ untuk kemudian dituangkan dalam *Single Line Diagram*. Selain mengumpulkan data peralatan juga dilakukan studi literatur mengenai standar-standar yang perlu diperhatikan dalam studi *Arc Flash*.
2. Pemodelan dan Simulasi
Setelah mendapatkan data dari eksisting peralatan yang ada dan kemudian dituangkan dalam *Single Line Diagram* maka akan dilakukan studi *Short Circuit* menggunakan *software* Etap 7.5 untuk mengetahui besarnya arus gangguan. Selain itu juga dilakukan simulasi koordinasi proteksi menggunakan *Star Device* untuk mengetahui koordinasi proteksi yang terpasang pada sistem kelistrikan JOB P-PEJ. Kemudian dilakukan resetting koordinasi pengaman yang salah. Selanjutnya dilakukan studi *Arc Flash* untuk mengetahui besarnya *incident energy* yang timbul saat gangguan pada sistem kelistrikan tersebut.
3. Analisis
Hasil dari simulasi studi *Arc Flash* berupa besarnya *incident energy* akan direduksi menggunakan metode *Zone Selective Interlocking* pada *software easy power* sehingga didapat nilai insiden energi yang mengalami pengurangan.

4. Kesimpulan

Langkah akhir dalam penyusunan Tugas Akhir ini adalah pembuatan kesimpulan dan hasil pengurangan insiden energi pada sistem tegangan rendah dengan metode ZSI

1.5 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dari penulisan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini seperti konsep dasar dari *Zone Selective Interlocking* dan teori dari *Arc Flash* serta perhitungan insiden energinya yang berdasarkan standar IEEE 1584-2002

BAB III : SISTEM KELISTRIKAN

Dalam bab ini akan dibahas mengenai sistem kelistrikan *Plant* CPA JOB P-PEJ serta data-data kelistrikan yang mendukung studi *Arc Flash* ini.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini dibahas mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan. bab ini menyajikan hasil koordinasi pengaman yang selektif, analisis terhadap besarnya *incident energy*, dan besar pengurangan insiden energinya menggunakan *zone selective interlocking* untuk kemudian diberikan kategori *personal safety outfit* bagi pekerja

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi teknik ZSI untuk pengurangan insiden energi *Arc Flash*.

1.6 Manfaat

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi PT. Petrochina dimana insiden energi yang bisa dikurangi serta pemilihan *safety outfit* yang sesuai dengan kategori
2. Dapat menjadi referensi bagi orang lain yang hendak mempelajari masalah serupa.

BAB 2

ARC FLASH DAN METODE ZSI

2.1 Definisi Arc Flash

Arc Flash merupakan dampak fisik dari adanya *arcing fault*. *Arcing fault* didefinisikan sebagai aliran arus listrik yang mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri arus (*arcing fault current*). Arus tersebut menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya seperti terlihat pada gambar 2.1. Busur api listrik merupakan bagian dari arus listrik yang besar melalui udara yang terionisasi. *Arc Flash* merupakan hasil pelepasan energi yang berbahaya karena terciptanya plasma busur listrik antara fasa bus bar satu dengan fasa bus bar lainnya, netral atau *ground* [2]. Plasma energi yang memicu terjadinya *Arc Flash* mengakibatkan beberapa kerugian fisik berupa ledakan bola api yang terhempas ke luar, panas yang dihasilkan ledakan bola api ini jika mengenai tubuh manusia dapat menyebabkan luka bakar yang parah. Cahaya gelombang bertekanan yang dihasilkan oleh ledakan dapat merusak dan menghempaskan orang ataupun peralatan yang ada disekitarnya. Sementara itu bunyi ledakan dapat mengganggu pendengaran dan konduktor yang meleleh menjadi tetesan-tetesan logam cair panas yang berpenjar ke segala penjuru. Secara fisik korban sangat mungkin menderita cedera kronis yang parah dan efek traumatik berkepanjangan berupa kecemasan, depresi, ataupun gejala psikologis lainnya [4].

Perencanaan kerja dan kepatuhan merupakan syarat mutlak untuk mengurangi terjadinya kemungkinan kecelakaan tragis akibat *Arc Flash*. Syarat ini berupa rincian strategi untuk mengeliminasi dan menanggulangi bahaya *Arc Flash*. Tindakan penyelamatan dan pencegahan yang pertama dapat berupa eliminasi atau substitusi, yaitu pengecekan dan pengujian secara berkala terhadap peralatan dan *grounding*. Tindakan lainnya berupa teknik kontrol yaitu berupa tindakan preventif agar tidak mendekati lokasi dan mengunci serta meninggikan pagar terhadap peralatan dan lokasi bahaya *Arc Flash*. Tindakan selanjutnya adalah berupa administrasi kontrol yang mencakup pelatihan kepada para pekerja akan bahaya dan cara penyelamatan serta tindakan pencegahan *Arc Flash*. tindakan selanjutnya adalah berupa *Personal Protective Equipment* atau PPE yang merupakan peralatan pelindung pribadi yang biasanya dianggap paling efektif sebagai metode perlindungan. PPE mencakup sarung tangan, pakaian tahan api dan pelindung wajah sesuai

dengan standar yang telah ditentukan [4]. Dan tindakan terakhir adalah dengan mengurangi insiden energi dari *Arc Flash* itu sendiri. Dengan pengurangan energi yang dilepaskan, akan mengurangi juga dampak bahaya dari *Arc Flash* ini. Semakin kecil insiden energi tentu lebih aman untuk pekerja dan juga baik untuk *lifetime* dari peralatan itu sendiri.



Gambar 2.1 Contoh *Arc Flash*

2.2 Perhitungan Energi *Arc Flash* Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 [3]

Perhitungan standar energi *Arc Flash* secara empiris berasal dari pemodelan yang memungkinkan terjadinya *Arc Flash*. Perhitungan diaplikasikan pada sistem dengan *range* tegangan tiga fasa 208 V-15000 V, frekuensi 50-60 Hz, *bolted fault current* 700 A-106 kA. Gap antar konduktor 13 mm- 152 mm dan sistem diuji dengan gangguan hubung singkat tiga fasa.

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002, menentukan nilai *arcing current* saat gangguan tiga fasa diperlukan untuk menentukan waktu operasi CB agar peralatan sistem dapat terlindungi. Persamaan untuk menentukan *arcing current* untuk sistem dibawah 1000 V adalah [3] :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0,000526 G + 0.5588V (\lg I_{bf}) - 0,00304G(\lg I_{bf}) \quad (2.1)$$

dimana,

$$\lg = \log_{10}$$

I_a = *arcing current* (kA)

K = -0,153 untuk *open configurations* dan -0,097 untuk *box configurations*

I_{bf} = *bolted fault current* untuk gangguan tiga fasa (kA)

V = tegangan sistem (kV)

G = jarak antar konduktor (mm)

Sementara itu untuk menentukan *arcing current* pada sistem 1000 V atau lebih digunakan persamaan berikut:

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2.2)$$

dimana,

\lg = \log_{10}

I_a = arus *Arc Flash / Arcing Current* (kA)

I_{bf} = *bolted three-phase fault at the bus symmetrical rms* (kA)

Untuk perhitungan arus *Arc Flash* pada level tegangan 1000 V atau lebih K (konstanta untuk *open* atau *box configurations*) diabaikan. Sementara itu untuk menghitung besar *incident energy* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 digunakan persamaan berikut[3]:

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 G \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) dapat di sederhanakan menjadi persamaan (2.4)

$$E_n = I_a^{1.081} \times 10^{(K1 + K2 + 0.0011G)} \quad (2.4)$$

dimana:

E_n = *incident energy* (J/cm²) *normalized* untuk waktu dan jarak

$K1$ = -0.792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*) dan
-0.555 untuk konfigurasi *box (enclosed equipment)*

$K2$ = 0 untuk sistem *ungrounded and high-resistance grounded* -0.113
untuk sistem *grounded*

G = *gap* antara *conductors* (mm)

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 persamaan (2.3) di *normalized* terlebih dahulu berdasarkan data untuk waktu *close circuit breaker* 0,2 s atau 200 ms, dan jarak antara titik *Arc Flash* dengan pekerja 610 mm.

Setelah dikonversi dari kondisi *normalized* didapatkan persamaan (2.5) dan dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.6) :

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.5)$$

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times (t/0.2)(610/D)^x \quad (2.6)$$

Dimana:

E = incident energy (J/cm²)

C_f = calculation factor,

1.0 untuk tegangan diatas 1kV

1.5 untuk tegangan dibawah 1kV

E_n = incident energy (J/cm²) normalized

t = arcing time (detik)

D = jarak antara titik *Arc Flash* dengan pekerja/ person

x = distance x factor, berdasarkan tabel 2.1 [3]

Standar untuk distance x factor dapat dilihat dalam tabel 2.1 seperti dibawah ini:

Tabel 2.1 Faktor Untuk Peralatan dan Kelas Tegangan [3]

System Voltage (kV)	Equipment type	Typical gap between conductors (mm)	Distance x factor
0.208–1	Open air	10–40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	MCC and panels	25	1.641
	Cable	13	2.000
>1– 5	Open air	13–102	2.000
	Switchgear	13–102	0.973
	Cable	13	2.000
>5–15	Open air	13–153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Cable	13	2.000

Sementara itu jarak standar antar konduktor (*gap*) dan jarak pekerja untuk masing-masing kelas peralatan ditunjukkan oleh tabel 2.2 dan 2.3:

Tabel 2.2 *Typical Bus Gaps* [3]

<i>Classes of equipment</i>	<i>Typical bus gaps (mm)</i>
<i>15kV Switchgear</i>	152
<i>5kV Switchgear</i>	104
<i>Low voltage switchgear</i>	32
<i>Low voltages MCCs and panelboards</i>	25
<i>cable</i>	13
<i>other</i>	<i>Not required</i>

Tabel 2.3 *Typical Working Distance* [3]

<i>Classes of equipment</i>	<i>Typical Working Distance (mm)</i>
<i>15kV Switchgear</i>	910
<i>5kV Switchgear</i>	910
<i>Low voltage switchgear</i>	610
<i>Low voltages MCCs and panelboards</i>	455
<i>cable</i>	455
<i>other</i>	<i>To be determined in field</i>

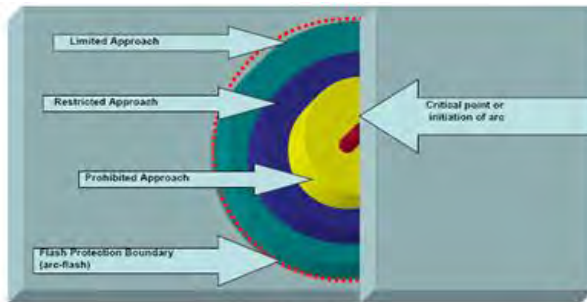
2.3 Batas Jarak Perlindungan Arc Flash

Batas jarak perlindungan terhadap titik *Arc Flash* disebut *flash protection boundary*. Ini merupakan batas jarak tertentu dengan konduktor aktif yang memungkinkan seseorang terpapar bahaya *Arc Flash* (*Arc-Flash Hazard*). Batasan jarak ini dapat dikategorikan setelah nilai insiden energi *Arc Flash* diketahui. Untuk meningkatkan kewaspadaan terhadap bahaya *Arc Flash*, pengetahuan tentang *flash protection boundary* sangat penting untuk dipahami sebagai upaya perlindungan baik terhadap peralatan maupun terhadap personal[1]. *Flash protection boundary* seperti terlihat pada gambar 2.2 meliputi :

1. *Limited approach boundary*, merupakan batas perlindungan untuk tidak dilewati oleh orang-orang yang tidak memenuhi syarat kecuali dikawal oleh orang-orang yang berpengalaman. Pada area yang

dibatasi biasanya terdapat bahaya sengatan listrik konduktor aktif.

2. *Restricted Approach Boundary*, merupakan batas perlindungan yang hanya boleh dilewati oleh orang-orang yang berpengalaman dan saat melintasi batas ini harus mengenakan pakaian dan peralatan yang dibutuhkan. Pada area ini, selain *Arc Flash* juga terdapat peningkatan resiko *shock* yang terjadi karena kombinasi *Arc Flash* dengan gerakan tidak sengaja dari para pekerja.
3. *Prohibited Approach Boundary*, merupakan batas perlindungan dimana jika melewati batas ini tidak hanya harus mengenakan pakaian dan peralatan pelindung tetapi juga hanya melibatkan orang-orang yang memenuhi kualifikasi terhadap *Arc Flash hazard* karena pada area ini dianggap para pekerja akan melakukan kontak langsung dengan konduktor aktif.
4. *Flash Protection Boundary*, merupakan batas perlindungan dimana tingkat *incident energy* sama dengan 1,2 cal/cm². Area ini memungkinkan pekerja mengalami dampak cedera parah jika terjadi *Arc Flash* [1].



Gambar 2.2 Ilustrasi Batas Perlindungan Terhadap Bahaya *Arc Flash* [1]

Flash protection boundary dapat ditentukan berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan menggunakan persamaan berikut [3]:

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.7)$$

Dimana:

D_B = jarak batas dari titik arcing (mm)

C_f = *Calculation factor*,

1.0 untuk tegangan diatas 1kV

1.5 untuk tegangan dibawah 1kV

E_n = incident energy normalized

E_B = incident energy in J/cm2 at the boundary distance

T = waktu arcing (detik)

X = jarak exponent dari tabel 2.1

Atau dapat juga dihitung dengan menggunakan metode Lee [3]

$$D_B = \sqrt{2.412 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.8)$$

Dimana:

I_{bf} = bolted fault current

2.4 Personal Protective Equipment (PPE)

Personal protective equipment merupakan perlengkapan keselamatan yang harus digunakan oleh *personal* yang akan masuk ke area rawan *Arc Flash*. Perlengkapan ini telah diatur berdasarkan standar NFPA 70E-2009 [4]. PPE dapat dikategorikan berdasarkan besarnya energi yang dihasilkan oleh *Arc Flash* (*incident energy*) serta dampak yang diakibatkan oleh *Arc Flash hazard* terhadap anggota tubuh manusia (*workers*). Contoh perlengkapan keselamatan yang harus digunakan ketika masuk ke area rawan *Arc Flash* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Contoh Perlengkapan Keselamatan

Alat pelindung diri bagi pekerja dikelompokkan berdasarkan kategori insiden energi yang dilepaskan seperti terlihat pada tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Kategori *Personal Protective Equipment* [2]

Category	Cal/cm ²	Clothing
0	1.2	<i>Untreated Cotton</i>
1	4	<i>Flame retardant (FR) shirt and FR pants</i>
2	8	<i>Cotton underwear FR shirt and FR pants</i>
3	25	<i>Cotton underwear FR shirt, FR pants and FR coveralls</i>
4	40	<i>Cotton underwear FR shirt, FR pants and double layer switching coat and pants</i>

Untuk lebih jelasnya peralatan pelindung diri (PPE) pada masing-masing kategori dijelaskan oleh tabel dibawah ini:

Personal Protective Equipment untuk kategori 1 dapat dilihat pada tabel 2.5 berikut:

Tabel 2.5 *Personal Protective Equipment* Untuk Kategori 1 [5]

Jenis	Peralatan dan pakaian pelindung
Pakaian	Pakaian lengan pendek Celana panjang
Pelindung mata	Kacamata

Personal Protective Equipment untuk kategori 2 dapat dilihat pada tabel 2.6 berikut:

Tabel 2.6 *Personal Protective Equipment* Untuk Kategori 2 [5]

Jenis	Peralatan dan Pakaian pelindung
Pakaian	Pakaian lengan pendek Celana panjang
Pelindung kepala	Helm
Pelindung mata	Kacamata
Pelindung wajah dan Kepala	Pelindung wajah dari <i>arc</i>
Pelindung tangan	Sarung tangan kulit
Pelindung kaki	Sepatu kerja kulit

Personal Protective Equipment untuk kategori 3 dan 4 dapat dilihat pada tabel 2.7 berikut:

Tabel 2.7 *Personal Protective Equipment* Untuk Kategori 3 dan 4 [5]

Jenis	Peralatan dan pakaian pelindung
Pakaian	Pakaian lengan panjang Celana panjang Jaket
Pelindung kepala	Helm
Pelindung mata	Kacamata
Pelindung wajah dan kepala	<i>Flash suit hood</i> Pelindung telinga
Pelindung tangan	Sarung tangan kulit
Pelindung kaki	Sepatu kerja kulit

tabel 2.8 adalah tabel PPE *minimum arc rating* berdasarkan kategori *Arc Flash* yang terjadi pada sebuah sistem kelistrikan [6]:

Tabel 2.8 *Summary of Protective Clothing Categories (From Table 130.7(C) of NFPA 70E 2004)* [6]

Hazard/ Category	Risk	PPE Minimum Arc Rating (cal/cm ²)	PPE Minimum Arc Rating (J/cm ²)
0		N/A	N/A
1		4	16.74
2		8	33.47
3		25	104.8
4		40	167.37

Ilustrasi klasifikasi alat pelindung diri berdasarkan kategori dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Ilustrasi klasifikasi Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori [2]

2.5 Gangguan Pada Sistem Kelistrikan

Suatu sistem kelistrikan sangat memungkinkan mengalami suatu gangguan yang mengakibatkan keadaan tidak normal pada rangkaian sistem tersebut. Berbagai macam gangguan ini menyebabkan ketidakberlangsungan kerja sistem dan mempunyai efek merusak kontinuitas pelayanan dan peralatan. Untuk melindungi peralatan dari dampak kerusakan gangguan maka sistem proteksi tenaga listrik harus dapat mengisolasi arus gangguan (*fault current*) dan menjaga kontinuitas daya pada bagian sistem yang tidak mengalami gangguan.

Secara umum klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh 2 faktor, yaitu:

1. Gangguan yang berasal dari dalam sistem
2. Gangguan yang berasal dari luar sistem

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain [7]:

1. Tegangan dan arus abnormal
2. Pemasangan yang kurang baik
3. Kesalahan mekanis karena proses penuaan

4. Beban lebih
5. Kerusakan material seperti isolator pecah, kawat putus, atau kabel cacat isolasinya.

Sedangkan untuk gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain [7]:

1. Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi terutama pada sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).
3. Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia.

Selain gangguan-gangguan diatas terdapat gangguan langsung pada sistem kelistrikan berupa [8]:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa
3. Gangguan hubung singkat 1 fasa
4. Gangguan beban lebih (*overload*), dan
5. Gangguan tegangan lebih (*over voltage*)

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi [7]:

1. Gangguan yang bersifat temporer, yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman dapat berubah menjadi gangguan permanen.
2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan/atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* (CB) oleh pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali.

Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

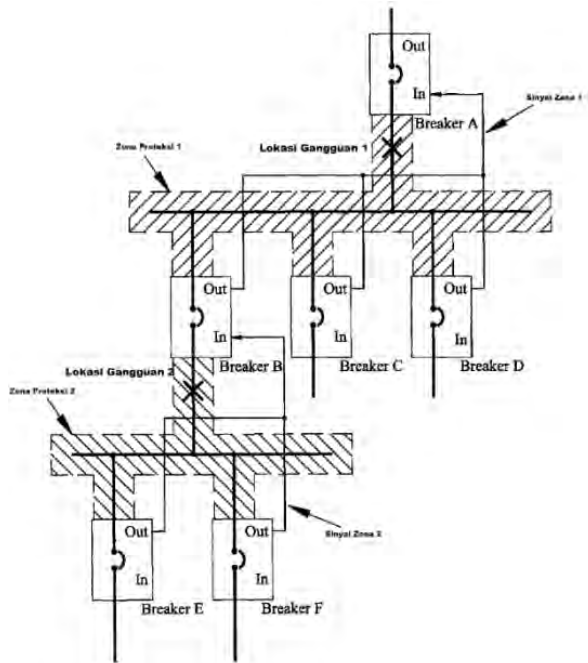
Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, dimana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

2.6 Definisi *Zone Selective Interlocking (ZSI)*

ZSI merupakan metode pengurangan insiden energy dari *Arc Flash* yang efektif dan relatif murah. Instalasi ZSI hanya membutuhkan kabel dan tenaga kerja jika circuit breaker *Trip Unit* sudah memiliki fitur ZSI [9]. Dua alasan utama dalam penggunaan ZSI adalah seberapa baik dan cocok digunakan pada *switchgear* yang ada serta pemasangan ZSI tidak mengubah prosedur atau operasi dari *switchgear*. Konsep ZSI bermula dari rele bus differensial yang dianggap terlampau mahal dan membutuhkan ruang banyak akibat dari pemasangan current transformer (CT) sehingga sejak itu ZSI dikembangkan karena tidak membutuhkan ruang besar dan lebih murah. ZSI dapat bekerja dalam 3 level, namun yang lebih efektif dan sering digunakan adalah 2 level [10].

Cara kerja dari ZSI menggunakan prinsip komunikasi antar *trip unit* sehingga antara *trip unit* satu dengan *trip unit* lainnya dapat mengirimkan sinyal maupun menerima sinyal. Sinyal tersebut digunakan untuk mengetahui daerah kerja dari CB untuk *Trip* sehingga pengamanan dari gangguan lebih cepat dan efektif. Cara kerja dari ZSI lebih mudah jika dijelaskan seperti dalam gambar 2.5.

Diasumsikan bahwa terjadi gangguan pada sisi beban dari breaker B yakni di lokasi gangguan 2. Baik breaker A dan breaker B merasakan gangguan. Breaker B mengirim sinyal *blocking* ke breaker A sebagai tanda agar breaker A mengerti bahwa gangguan berada pada zona proteksi breaker B. Sinyal *blocking* tersebut sekaligus memberi informasi ke breaker A untuk *Trip* sesuai *time delay* atau sebagai *back up* dari breaker B. Maka breaker B yang bertugas untuk mengamankan gangguan tersebut tanpa *delay* [9]. *Timing* dari ZSI sendiri adalah sebesar 0.01 detik sehingga sinyal *blocking* dapat dikirim terlebih dahulu sebelum breaker *trip* tanpa *delay* [13].



Gambar 2.5 Skema Metode ZSI

Namun jika gangguan terjadi pada *switchgear* atau pada gambar berada pada lokasi gangguan 1 (seperti yang terjadi saat memutar CB), maka tidak ada *blocking signal* yang akan dikirimkan ke breaker A atau bisa disebut breaker A tidak menerima sinyal. Sehingga, ketika breaker A merasakan ada gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking*, maka breaker A akan *Trip* secara instant tanpa waktu tunda[9]. Breaker satu dengan lainnya dihubungkan dengan kabel untuk berkomunikasi dengan mengirimkan *blocking signal*. Sehingga dari cara kerja tersebut insiden energy dari *Arc Flash* dapat dikurangi karena berdasarkan prinsip waktu *Trip Unit* kerja semakin cepat mengamankan gangguan, maka insiden energy yang terlepas semakin kecil. Dalam proses instalasi dari ZSI sendiri perlu dilakukan manajemen waktu dan tenaga karena dapat memakan waktu yang tidak sedikit.

Dalam penerapan ZSI sebagai solusi dari pengurangan energi *Arc Flash* terdapat beberapa yang harus diperhatikan yakni [9]:

1. Ini bekerja secara otomatis – (tidak perlu adanya tindakan pencegahan)
2. Ini hanya berdampak pada karakteristik *short time delay* dan *ground fault time delay*
3. Arus gangguan arcing harus berada di atas setting STPU (*short time pick up*) untuk mengurangi insiden energi
4. ZSI membutuhkan tambahan 2 cycle (maksimum 3 cycle) agar breaker *Trip* dibandingkan dengan instant *Trip* yang mencapai 5-6 cycle
5. ZSI memerlukan prosedur tes breaker yang sedikit berbeda selama perawatan atau kalibrasi

ZSI sendiri awalnya merupakan kemampuan *Trip Unit* pada *low voltage circuit breaker* untuk mengurangi fault stress pada peralatan. Namun dalam pengembangannya dapat digunakan untuk mengurangi insiden energi *Arc Flash* karena berdasarkan semakin cepat pengaman berhasil mengamankan gangguan maka semakin kecil pula insiden energi *Arc Flash* yang dilepaskan sehingga insiden energi yang seringkali sangat besar karena hanya berdasarkan koordinasi proteksi biasa tanpa memperhitungkan *Arc Flash*, kini dengan menggunakan metode ZSI ini maka prinsip koordinasi dan selektivitas menjadi tidak berseberangan. artinya dengan koordinasi proteksi yang benar dan sesuai standar pun insiden energi yang terjadi pada *switchgear* tegangan rendah dapat dikurangi menjadi lebih kecil. Selama ini timbul persepsi bahwa koordinasi proteksi yang sesuai standar tidak bisa mengamankan *Arc Flash* dengan baik.

Hal ini diakibatkan oleh *time delay* antara *upstream circuit breaker* dan *downstream circuit breaker* harus memenuhi dari standar kaidah koordinasi proteksi, yakni 0.2 detik - 0.4 detik sehingga *upstream circuit breaker* yang memiliki selang waktu sekian detik tersebut akan mengalami insiden energi *Arc Flash* yang besar karena dengan arus gangguan yang sama memiliki waktu *Trip* yang lebih panjang.

Pada Tugas Akhir ini simulasi ZSI dimodelkan menggunakan *Software Easy Power*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk kurva pengaman saat teknik ZSI diaplikasikan pada sistem tegangan rendah. Selain itu dengan *Software Easy Power* akan diketahui seberapa besar hasil dari pengurangan insiden energi *Arc Flash*. Contoh

Trip device pada sistem tegangan rendah yang memiliki fitur ZSI pada *Software Easy Power* dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini:

LV Breaker Data

Connection Information

ID Name: BL-1

On Bus = BUS-1

Connection Type = Feeder

Base kV: 0.48

☐ Open ☒ Closed

☐ Lock Auto-Sizing

☐ Lock Auto-Coordination

Specifications | Short Circuit | Phase Trip | Gnd Trip | **ZSI** | Fuse | Mtr O/L | Harmonics | Stability | Comments

Unrestrained Settings

☒ ST ZSI

☐ Inst ZSI

☐ Ground ZSI

(I^x) t: Out Delay: <None>

(I^x) t: Out Delay:

	Upstream Breaker ID	Upstream ZSI
1	BL-2	Enabled
2	BL-3	Enabled
3		

Auto Select

☐ Self Restrained

OK Cancel Help

Gambar 2.6 Fitur ZSI di LVCB pada *Software Easy Power 9.6*

Gambar 2.6 merupakan contoh pengisian data dari LVCBCB di *Software Easy Power*. LVCB tersebut memiliki fitur ST ZSI sehingga ZSI bekerja dengan waktu *Short Time*. Kolom *Upstream Breaker ID* merupakan CB yang berada di atasnya dan juga memiliki fitur ZSI. Sehingga antar CB bisa berkomunikasi untuk mengirim sinyal *blocking* ke CB atasnya. Untuk LVCB yang berada paling akhir atau paling atas, kolom *Upstream Breaker ID* tidak diisi yang artinya LVCB tersebut hanya menerima sinyal *blocking* dan tidak mengirim sinyal apapun ke CB lain.

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN *PLANT CENTRAL PROCESSING AREA JOINT OPERATING BODY PERTAMINA – PETROCHINA EAST JAVA*

3.1 Sistem Kelistrikan JOB P-PEJ (Joint Operating Body Pertamina- Petrochina East Java)

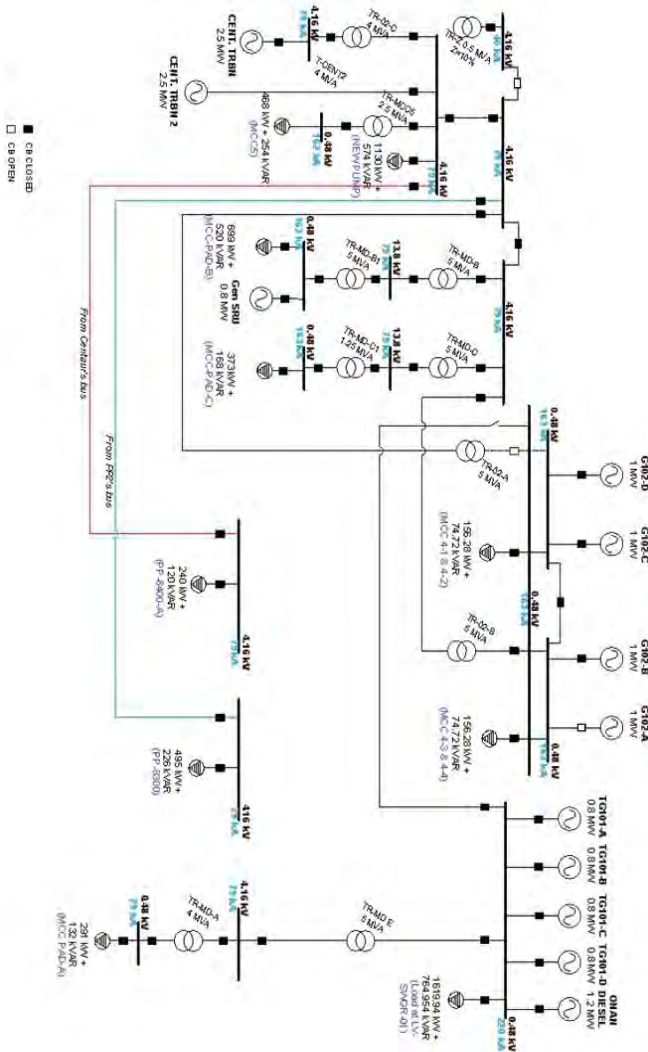
Plant CPA JOB P-PEJ Tuban memiliki sistem kelistrikan berupa sistem *ring* yang disupply oleh 11 unit generator dan memiliki 11 unit trafo serta terdiri dari beban lumped dan beban motor yang dikelompokkan kedalam MCC (*Motor Control Center*).

Plant CPA JOB P-PEJ Tuban memiliki sistem kelistrikan yang di-*supply* oleh beberapa generator yang dapat dilihat di tabel 3.1

Tabel 3.1 Data Generator pada JOB P-PE

No.	ID	RATING DAYA (MW)	RATING TEGANGAN (kV)
1	CENT. TRBN BY CTRCTR (RENT)	2.5	4.16
2	DIESEL. ENG KBT (RENTAL)	0.8	0.48
3	G.ENG GEN.G102-A	1	0.48
4	G.ENG GEN.G102-B	1	0.48
5	G.ENG GEN.G102-C	1	0.48
6	G.ENG GEN.G102-D	1	0.48
7	GEN TG101-A	0.8	0.48
8	GEN TG101-B	0.8	0.48
9	GEN TG101-C	0.8	0.48
10	GEN TG101-D	0.8	0.48
11	GEN ODE	1.2	0.48

Gambar *single line diagram* dari Plant JOB P-PEJ Tuban dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Single Line Diagram pada Sistem Kelistrikan Plant CPA
JOB P- PEJ Tuban

3.2 Data Kelistrikan JOB P-PEJ Tuban

Sebagai suatu sistem kelistrikan yang kompleks, sistem kelistrikan pada JOB P-PEJ sangat mungkin mengalami gangguan. Oleh karena itu digunakan *software* ETAP 7.5 untuk mensimulasikan gangguan yang mungkin terjadi. Karena studi Tugas Akhir ini bertujuan untuk mengurangi nilai gangguan berupa insiden energi dari *Arc Flash*, maka melalui simulasi akan didapatkan nilai yang bisa dikurangi menggunakan metode ZSI.

3.2.1 Rating Tegangan

Terdapat tiga rating tegangan yang bekerja pada sistem JOB P-PEJ yaitu:

1. Tegangan 0.48 kV
Tegangan ini merupakan tegangan keluaran dari generator serta tegangan sistem dari JOB P-PEJ. Tegangan inilah yang akan digunakan sebagai referensi dalam Tugas Akhir ini.
2. Tegangan 4.16 kV
Tegangan ini merupakan tegangan keluaran dari trafo Generator CENT. TRBN BY CTRCTR (RENT)
3. Tegangan 13.8 kV
Tegangan ini merupakan tegangan keluaran trafo TR-MD-B pada bus MV SWGR 1250A untuk mengurangi *drop* tegangan

3.2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik JOB P-PEJ, Tuban

Sistem distribusi adalah suatu kesatuan peralatan yang bekerja secara bersama dan terpadu untuk menyalurkan energi listrik dari sumber ke beban.. Berbagai macam jenis rangkaian dasar tersedia untuk distribusi daya bagi industri, pada umumnya biaya suatu sistem semakin meningkat bersama dengan keandalan sistem apabila di dukung dengan kualitas komponen yang tinggi.

Tenaga listrik yang masuk ke JOB P-PEJ akan didistribusikan ke seluruh beban dengan didukung oleh beberapa trafo daya yang menyuplai beban dengan rating tegangan tertentu. Trafo-trafo yang digunakan adalah sebagai berikut seperti terlihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Transformator Daya Penyuplai Beban

No	Trafo	Tegangan (kV)	Kapasitas	
1	T42	0,38/4,16	3	MVA
2	TR-02-A	0,48/4,16	5	MVA
3	TR-02-B	0,48/4,16	5	MVA
4	TR-02-C	4,16/416	4	MVA
5	TR-MCC5	4,16/0,48	2,5	MVA
6	TR-MD-A	4,16/0,48	5	MVA
7	TR-MD-B	4,16/13,8	5	MVA
8	TR-MD-B1	13,6/0,48	5	MVA
9	TR-MD-C	4,16/13,8	5	MVA
10	TR-MD-C1	13,8/0,48	1,25	MVA
11	TR-MD-E	0,48/4,16	5	MVA

3.2.3 Data Beban JOB P-PEJ

Beban-beban pada sistem kelistrikan JOB P-PEJ terdiri dari beberapa beban sebagai berikut:

- **Motor**
Digunakan sebagai penggerak peralatan operasi. Terdiri dari 36 motor induksi dengan tegangan nominal sebesar 0.48 kV. Beban ini dikelompokkan ke dalam MCC (*Motor Control Center*)
- **Lumped Load**
Digunakan untuk kegiatan operasional di JOB P-PEJ

Data kapasitas dari beban-beban pada JOB P-PEJ seperti terlihat pada tabel 3.3 berikut ini:

Tabel 3.3 Data Beban MCC pada sistem JOB P-PEJ

No.	INSTRUMENT	ID	Dava (kW)
1.	MOTOR MCC 4-1	RADIATOR FAN 4-1	30
		M201-501	55
2.	MOTOR MCC 4-2	RADIATOR FAN 4-2	30
		M201-501 4-2	55
3.	MOTOR MCC 4-3	RADIATOR FAN 4-3	30
		M201-501 4-3	55
4.	MOTOR MCC 4-4	RADIATOR FAN 4-4	30
		M201-501 4-4	55
5.	MCC 1-2	M-PP1150-A	186.5
		M-PP1150-B	186.5
		M-PP1150-C	186.5
		M-PP1150-D	186.5
6.	MCC 5	PP 600 A	74.6
		PP 600 B	74.6
		CP-9400	82
		Mtr 385	330
7.	MCC PAD B	MUDI B02A	119.3
		MUDI B05	119.3
		MUDI B09	119.3
		MUDI B15	119.3
		MUDI B17	74.6
		MUDI B18	238.7
		MUDI B23	238.7
		MUDI B24	119.3
8.	MCC PAD C	MUDI C13	74.6
		MUDI C20	238.7
		MUDI C7	74.6

Tabel 3.3 Data Beban Motor pada *Plant CPA JOB P-PEJ*, Tuban
(lanjutan)

No.	INSTRUMENT	ID	Daya (kW)
9	MCC WTR DSPL	MTR WTR DSPL 1	283.4
10.	PAD A	MUDI A1	298.4
		MUDI A19	74.6
11.	MCC 1-1	M-PP-1170-A	112
		M-PP-1170-B	112
		M-PP-1170-C	112
		M-PP-1170-D	112
12.	PROCESS PLANT	CP-9300 A	74.6
		CP-9300 B	74.6
		FL-200	30
		FL-300	45
		PP-3310 A	45
		PP-3310 B	45
		PP-3310 C	45
		PP-500 A	45
		PP-500 B	45
		PP-500 C	42.5
		PP-500 D	42.5
		PP-7031 A	30
		PP-7031 B	30
		PP-9610 B	42.5

Tabel 3.3 Data Beban Motor pada *Plant CPA JOB P-PEJ*, Tuban
(lanjutan)

No.	INSTRUMENT	ID	Daya (kW)
13.	NEW PUMP	NEW P1	448
		NEW P2	448
		NEW P3	448
		NEW P4	448
14.	PUMP	S-PUMP PP-8300-A	448
		S-PUMP PP-8300-B	336

Sedangkan lokasi tipikal yang akan diterapkan teknik ZSI agar insiden energi *Arc Flash* bisa berkurang dapat dilihat pada gambar 3.2.

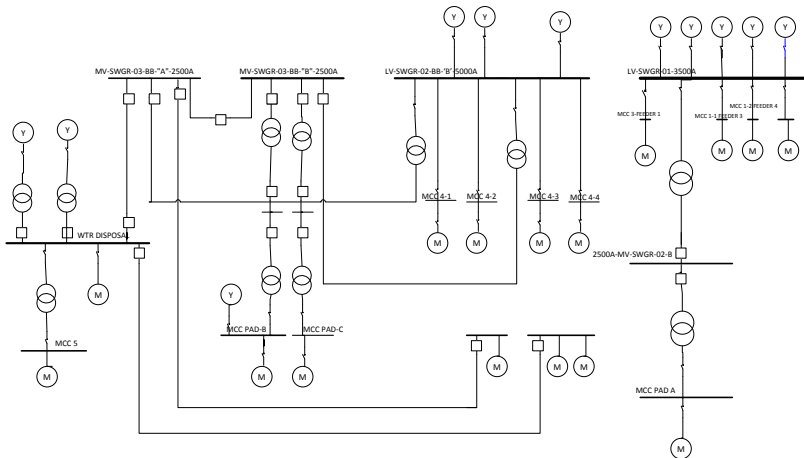
BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan

Tugas Akhir ini membahas tentang pengurangan insiden energi *Arc Flash* sistem tegangan rendah 0.48 kV di Plant CPA JOB P-PEJ Tuban, Jawa Timur. Proses pengurangan insiden energi ini dilakukan dengan teknik *Zone Selective Interlocking*. Setelah didapatkan kondisi *resetting* dan koordinasi pengaman yang benar, selanjutnya diterapkan teknik ZSI untuk mendapatkan insiden energi *Arc Flash* yang lebih kecil tanpa merusak koordinasi pengaman yang ada sehingga lebih efektif dan efisien.

Untuk mempermudah melakukan analisis, sistem kelistrikan akan dimodelkan dalam *Single Line Diagram* menggunakan ETAP 7.5. Berikut pemodelan sistem kelistrikan JOB P-PEJ seperti terlihat pada gambar 4.1.



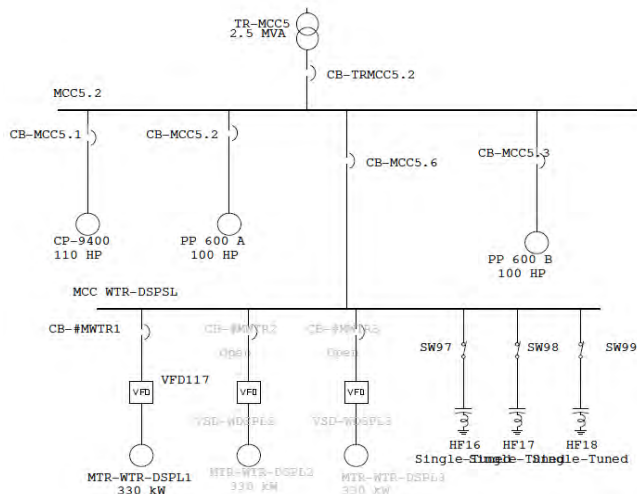
Gambar 4.1 *Single Line Diagram* JOB P-PEJ

Setelah *Single Line diagram* terbentuk, maka dilanjutkan dengan studi aliran daya (*Load Flow*) dan hubung singkat (*Short Circuit*). Studi aliran daya disini dimaksudkan untuk melihat apakah sistem kelistrikannya sudah baik dan tidak mengalami kelebihan pembebanan. Simulasi hubung singkat yang dilakukan adalah hubung singkat antar fasa minimum (30 cycle) serta hubung singkat maksimum 3 fasa (1/2 cycle).

Kemudian dengan data hasil tersebut dilakukan perbaikan-perbaikan koordinasi pengaman untuk mendapatkan hasil koordinasi yang mampu mengamankan gangguan. Kemudian dari hasil setting pengaman tersebut digunakan untuk menghitung insiden energi *Arc Flash* yang terjadi. Kemudian dengan menggunakan *Software Easy Power* disimulasikan teknik *Zone Selective Interlocking* untuk mengurangi insiden energi *Arc Flash* yang terjadi.

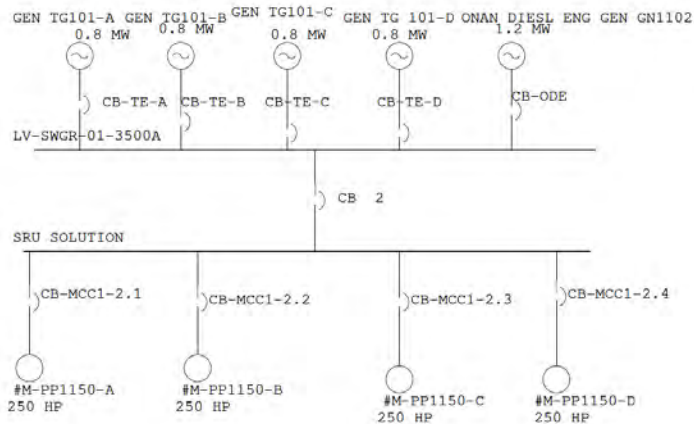
Untuk melakukan pengurangan insiden energi *Arc Flash* dengan teknik ZSI, diambil dua tipikal pemodelan tegangan rendah 0.48 kV yang mewakili sistem pengamanan pada JOB P-PEJ. Adapun tipikal yang akan diambil pada tugas akhir ini adalah pada MCC 5 dan MCC 1-4 feeder 2. MCC 5 mulai dari Motor MTR-MWTR1, bus MCC MTR-DSPSL, bus MCC5.2 hingga Trafo TR-MCC5. Teknik ZSI akan diterapkan pada tegangan rendah 0.48 kV CB-#MWTR1, CB-MCC5.6, CB-MCC5.1 dan CB-TRMCC5.2. Sedangkan MCC 1-4 feeder 2 mulai dari M-PP1150-A, Bus SRU Solution, LV-SWGR-3500-A, hingga Generator. Teknik ZSI akan diterapkan pada tegangan rendah 0.48 kV CB MCC1-2.1, CB 2, CB-ODE, dan CB TE-B.

Tipikal 1 adalah pada MCC 5 dimana terdapat beban motor-motor dengan kapasitas seperti terlihat pada gambar 4.2



Gambar 4.2 Tipikal 1 MCC 5

Tipikal 2 adalah pada MCC 1-2 Feeder 4 yang terdapat sumber generator untuk mensuplai beban di JOB-PPEJ seperti terlihat pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Tipikal 2 MCC1-2 Feeder 4

4.2 Pengaturan Pengaman Arus Lebih

Terdapat dua tahap *setting* peralatan pengaman arus lebih, yaitu *setting* untuk beban penuh dan *setting* untuk hubung singkat. *Setting* beban penuh adalah nominal *rating* arus beban penuh (*Full Load Ampere*) pada peralatan (transformator/motor/lainnya), bukan pada *operating current* yang berdasarkan pada kondisi beban mekanis (untuk motor) atau beban listrik. Hal ini disebabkan ketahanan terhadap kerusakan peralatan ditujukan terhadap arus gangguan yang lebih besar dari nominal *rating*-nya.

Sedangkan untuk pengaman hubung singkat harus memperhitungkan arus hubung singkat minimum dan maksimum yang disebabkan konfigurasi sistem.. Arus hubung singkat dapat diketahui dengan menghitung impedansi pada sistem yang mengalami gangguan hubung singkat. Dengan menggunakan ETAP 7.5 arus hubung singkat dapat diketahui dengan menjalankan simulasi hubung singkat pada bus-bus yang telah ditentukan. Adapun arus hubung singkat pada JOB P-PEJ ditunjukkan pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

Tabel 4.1 Data arus hubung singkat di MCC 5

Bus		$I_{sc \text{ max } 0.5 \text{ cycle}}$	$I_{sc \text{ min } 30 \text{ cycle}}$
ID	kV	kA	kA
MCC5.2	0.48	33.60	21.05
Bus MCC WTR-DSPL	0.48	33.60	21.05

Tabel 4.2 Data arus hubung singkat di MCC 1-2 feeder 4

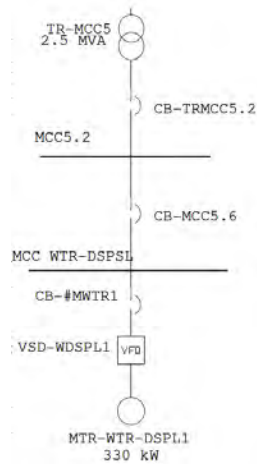
Bus		$I_{sc \text{ max } 0.5 \text{ cycle}}$	$I_{sc \text{ min } 30 \text{ cycle}}$
ID	kV	kA	kA
LV-SWGR- 3500-A	0.48	39.66	17.67
SRU Solution	0.48	39.66	17.67

4.3 Simulasi Koordinasi Pengaman Kondisi Eksisting

Pada kondisi eksisting, data sistem pengaman dimodelkan sesuai dengan kondisi di lapangan. Data eksisting pada PT. Petrochina didapat dari data sekunder. Data pengaman yang ada akan diplot untuk melihat apakah peralatan pengaman pada sistem JOB PPEJ sudah bekerja dengan baik dan benar.

4.3.1 Simulasi pada Tipikal 1a

Pemodelan sistem pengaman eksisting tipikal 1a dapat dilihat pada gambar 4.4, dimulai dari Trafo TR-MCC5 sampai ke motor. Pada motor MTR-WTR-DSPSL1 terdapat VFD (*variable frequency drive*) yang digunakan untuk mengatur kecepatan dari motor tersebut. Efek dari adanya VFD ini adalah tidak ada arus kontribusi dari motor menuju bus gangguan yang disimulasikan. Sedangkan pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-MWTR1, LVCB MCC5.6, dan LVCB MCC5.2.



Gambar 4.4 Sistem Pengaman JOB P-PEJ Tipikal 1a

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor MTR-WTR-DSPSL maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB MWTR. Jika CB MWTR gagal untuk mengamankan, CB-MCC5.6 akan menjadi *back up* sekaligus menjadi pelindung bus SRU Solution. Selanjutnya CB-TRMCC5.2 berfungsi untuk melindungi trafo TR-MCC5 sekaligus menjadi *back up* apabila CB MCC5.6 gagal bekerja.

Berikut setting pengaman kondisi eksisting yang didapat dari data sekunder seperti terlihat pada tabel 4.3:

Tabel 4.3 Data Eksisting CB di MCC 5

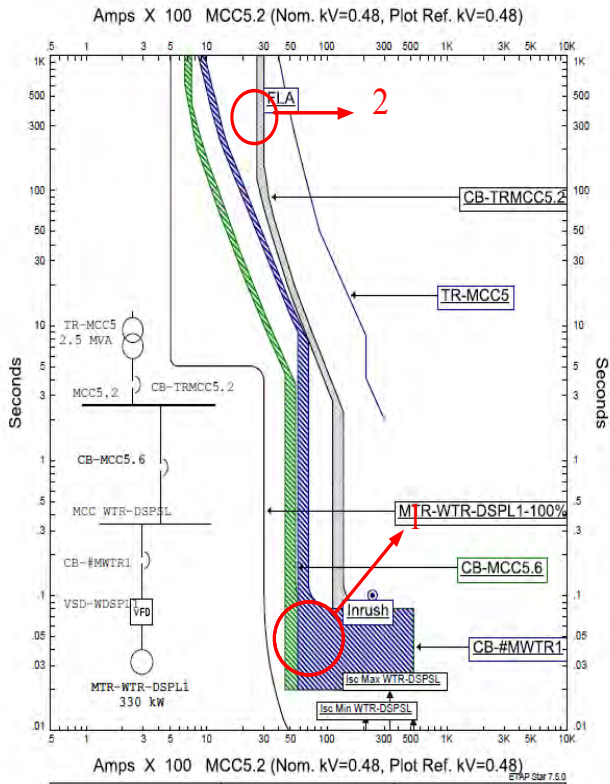
ID	Manufacturer	Model	Setting	
CB MWTR1	Square-D	Micrologic	Sensor	800
			LT Pick Up	1
			LT Band	16
			ST Pick Up	8
			ST Band	0.1

Tabel 4.3 Data Eksisting CB di MCC 5 (Lanjutan)

ID	Manufacturer	Model	Setting	
CB-MCC5.6	Square-D	Micrologic	Sensor	1250
			LT Pick Up	0.4
			LT Band	2
			ST Pick Up	5
			ST Band	0.1
CB-TRMCC5.2	Square-D	Micrologic	Sensor	2500
			LT Pick Up	1
			LT Band	2
			ST Pick Up	5
			ST Band	0.1
CB MCC5.1	Square-D	Micrologic	Sensor	1250
			LT Pick Up	0.4
			LT Band	2
			ST Pick Up	5
			ST Band	0.1

Kurva koordinasi dari data diatas dapat dilihat di simulasi *ETAP star system*. Simulasi ini digunakan untuk melihat bagaimana koordinasi pengaman kondisi eksisting pada sistem kelistrikan CPA JOB P-PEJ. Sedangkan untuk simulasi *Arc Flash* di tipikal 1a pada kondisi eksisting ini, insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan masih terdapat kesalahan dalam koordinasi proteksinya sehingga belum tercapai sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan plant CPA JOB P-PEJ.

Berikut adalah bentuk kurva koordinasinya pada *software* ETAP 7.5 seperti terlihat pada gambar 4.5 ini:



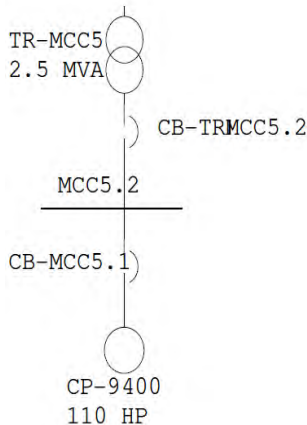
Gambar 4.5 Kurva Koordinasi Sistem Pengaman Tipikal 1a

Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu:

1. Setting Waktu CB #MWTR1, CB-MCC5.6, dan CB-MCC5.2 diset *Trip* berbarengan. Ini mengakibatkan jika hubung singkat di motor maka semua CB akan *Trip* bersamaan sehingga mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan.
2. Setting LT Pick Up CB-TRMCC5.2 tidak mempertimbangkan FLA Sekunder Trafo sehingga FLA akan diasumsikan sebagai gangguan

4.3.2 Simulasi pada Tipikal 1b

Pemodelan sistem pengaman eksisting tipikal 1b dapat dilihat pada gambar 4.6. Dimulai dari Trafo TR-MCC5 sampai ke Motor CP-9400 110HP. Pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-MCC5.1 dan LVCB-TRMCC5.2.

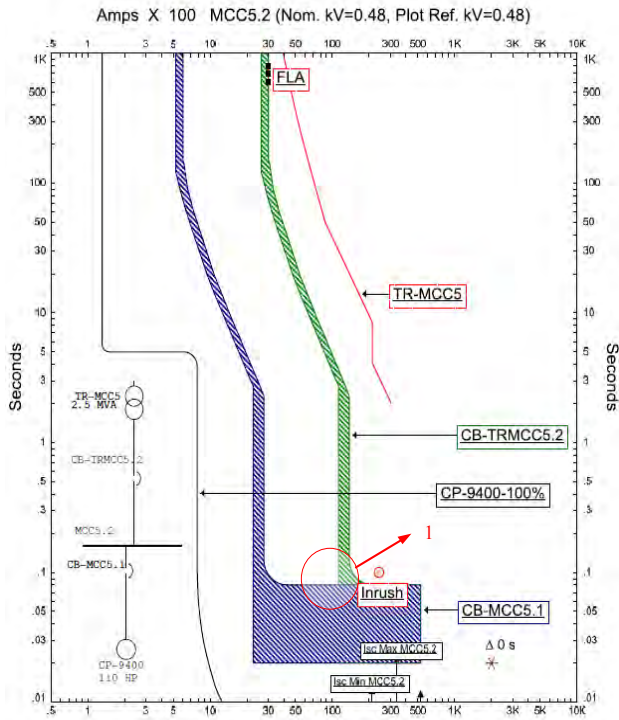


Gambar 4.6 Sistem Pengaman JOB P-PEJ Tipikal 1b

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor CP-9400 110HP maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB MCC5.1. Jika CB MCC5.1 gagal untuk mengamankan, CB-TRMCC5.2 akan menjadi *back up* sekaligus menjadi pelindung bus MCC5.2 dan trafo TR-MCC5.

Kurva koordinasi dapat dilihat di simulasi *ETAP Star System*. Simulasi ini digunakan untuk melihat bagaimana koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan CPA JOB P-PEJ tipikal 1b. Sedangkan untuk simulasi *Arc Flash* di tipikal 1b pada kondisi eksisting ini, insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan masih terdapat kesalahan dalam koordinasi proteksinya sehingga belum tercapai sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan plant CPA JOB P-PEJ.

Berikut adalah bentuk kurva koordinasinya pada *software* ETAP 7.5 seperti terlihat pada gambar 4.7 ini:



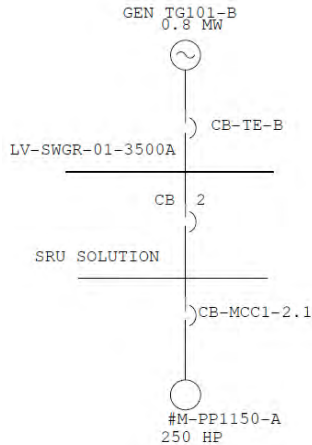
Gambar 4.7 Kurva Koordinasi Sistem Pengaman Tipikal 1b

Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu:

1. Setting waktu CB-MCC5.1 dan CB TR-MCC5.2 sama sehingga akan *trip* berbarengan dan tidak bisa menjadi *back up*

4.3.3 Simulasi pada Tipikal 2

Pemodelan sistem pengaman eksisting tipikal 2 dapat terlihat pada gambar 4.8. Dimulai dari Generator TG101-B sampai ke Motor CB-MCC1-2.1. Pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-TE-B dan LVCB MCC 2.



Gambar 4.8 Sistem Pengaman JOB P-PEJ Tipikal 2

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor M-PP1150-A 250HP maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB MCC1-2.1. Jika CB MCC1-2.1 gagal untuk mengamankan, CB 2 akan menjadi *back up* sekaligus menjadi pelindung bus SRU Solution. Selanjutnya CB-TE-B berfungsi untuk mengamankan generator dari gangguan sekaligus menjadi pengaman bus LV-SWGR-01-3500A

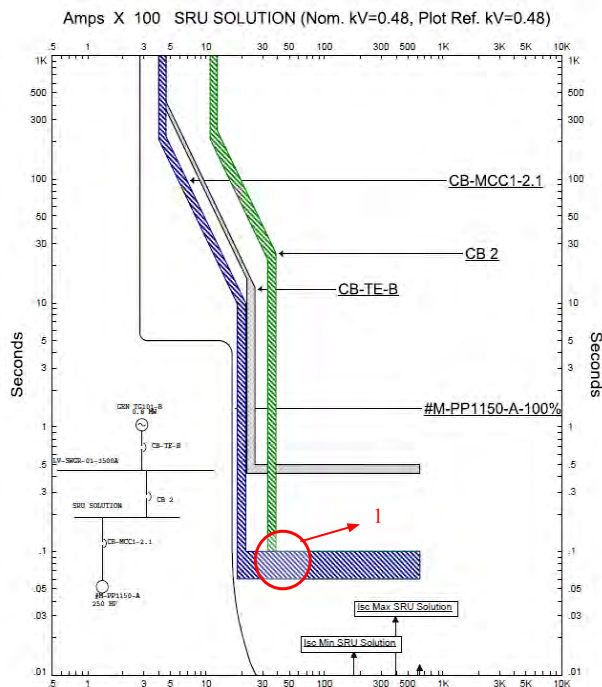
Berikut setting pengaman kondisi eksisting yang didapat dari data sekunder seperti terlihat pada tabel 4.4:

Tabel 4.4 Data Eksisting CB di MCC 1-2 Feeder 4

ID	Manufacturer	Model	Setting	
CB MCC1-2.1	Square-D	Micrologic	Sensor	800
			LT Pick Up	0.5
			LT Band	2
			ST Pick Up	2.5
			ST Band	0.1
CB 2	Square-D	Micrologic	Sensor	2000
			LT Pick Up	0.6
			LT Band	3
			ST Pick Up	2
			ST Band	0.1

Untuk pengaman generator, data eksistingnya tidak diketahui. Kurva koordinasi dari data eksisting dapat dilihat di simulasi *ETAP Star System*. Simulasi ini digunakan untuk melihat bagaimana koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan. Sedangkan untuk simulasi *Arc Flash* di tipikal 2 pada kondisi eksisting ini, insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan masih terdapat kesalahan dalam koordinasi proteksinya sehingga belum tercapai sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan plant CPA JOB P-PEJ.

Berikut ini adalah bentuk kurva koordinasinya seperti terlihat pada gambar 4.9 dibawah ini:



Gambar 4.9 Kurva Koordinasi JOB P-PEJ Tipikal 2

Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu:

1. CB 2 akan *Trip* bersamaan dengan CB MCC1-2.1 sehingga mengganggu kontinuitas daya kepada beban lain.

4.4 Simulasi Koordinasi Pengaman dan *Arc Flash* pada Kondisi *Resetting*

Untuk memenuhi standar serta mendapatkan koordinasi pengaman yang selektif, akan dilakukan *Resetting* pengaman. Selanjutnya dilakukan analisa *Arc Flash* menggunakan standar IEEE 1584-2002 untuk menghitung nilai incident energy *Arc Flash* dan simulasinya menggunakan *Software* ETAP 7.5.

4.4.1 Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* pada Tipikal 1

Sebelum melakukan simulasi *Arc Flash*, dilakukan *Resetting* pada CB MWTR1, CB-TRMCC5.2 dan CB-MCC5.6, dan CB MCC5.1

- **LVCB MWTR1**

Manufacturer	: Square-D
Model	: Micrologic
FLA motor	: 501.3 A
Lock Rotor Current (LRC)	: 3007.8 A
Isc min MCC WTR-DSPL	: 21.05 kA (0.48 kV)
Isc max MCC WTR-DSPL	: 33.60 kA (0.48 kV)
Sensor	: 800
Rating Plug	: 800

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Motor MTR-WTR-DPSL} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$$

$$\text{MTR-WTR-DPSL}$$

$$1.05 \times 501.3 < \text{Iset} < 1.3 \times 501.3$$

$$526.365 < \text{Iset} < 651.69$$

$$\text{Dipilih Iset} = 560 \text{ A}$$

$$\text{LT Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{560}{800} = 0.7$$

Long Time Band

$$\text{Dipilih LT Band} = 16$$

Short Time Pick Up

$$\text{LRC} \leq \text{Iset} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$3007.8 \leq \text{Iset} \leq 0,8 \times 24940$$

$$3007.8 \leq \text{Iset} \leq 19952$$

Dipilih Iset = 4000 A,

$$\text{ST Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{4000}{800} = 5$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.1s

- **LVCB-MCC5.1**

Manufacturer : Square-D

Model : Micrologic

FLA motor : 131.1 A

Lock Rotor Current (LRC) : 786.6 A

Isc Min MCC5.2 : 21.05 kA (0.48 kV)

Isc Max MCC5.2 : 33.60 kA (0.48 kV)

Sensor : 1200

Rating Plug : 1200

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Motor CP-9400} < \text{Iset} < 0.8 \times \text{Isc min MCC5.2}$$

$$1.05 \times 131.1 < \text{Iset} < 0.8 \times 21050$$

$$137.655 < \text{Iset} < 16840$$

Dipilih Iset = 600 A

$$\text{LT Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{600}{1200} = 0.5$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 2

Short Time Pick Up

$$\text{LRC} \leq \text{Iset} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$$

$$786.6 \leq \text{Iset} \leq 0,8 \times 21050$$

$$786.6 \leq \text{Iset} \leq 16840$$

Dipilih Iset = 3000 A,

$$\text{ST Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{3000}{1200} = 2.5$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.1s

- **LVCB-MCC5.6**

Manufacturer	: Square-D
Model	: Micrologic
Isc Min MCC WTR-DSPL	: 21.05 kA (0.48 kV)
Isc Max MCC WTR-DSPL	: 33.60 kA (0.48 kV)
Sensor	: 1200
Rating Plug	: 1200

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Motor} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$$

$$1.05 \times 501.3 < \text{Iset} < 1.3 \times 501.3$$

$$526.365 < \text{Iset} < 651.69$$

Dipilih Iset = 600 A

$$\text{LT Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{600}{1200} = 0.5$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 16

Short Time Pick Up

$$\text{Iset} \leq 0,8 \times \text{Isc Min MCC5.2}$$

$$\text{Iset} \leq 0,8 \times 21050$$

$$\text{Iset} \leq 16840$$

Dipilih Iset = 4800 A,

$$\text{ST Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{4800}{1200} = 4$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.3s

- **LVCB-TRMCC5.2**

Manufacturer	: Square-D
Model	: Micrologic
FLA sekunder Trafo MCC 5	: 3007 A
Isc min MCC5.2	: 21.05 kA (0.48 kV)
Isc max MCC5.2	: 33.60 kA (0.48 kV)
Sensor	: 4000
Rating Plug	: 3200

Long Time Pick Up

$1.05 \times \text{FLA Sekunder Trafo MCC5} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Sekunder Trafo}$

$1.05 \times 3007 < \text{Iset} < 1.3 \times 3007$

$3157.35 < \text{Iset} < 3909.1$

Dipilih Iset = 3200 A

$$\text{LT Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{3200}{3200} = 1$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 4.5

Short Time Pick Up

$\text{Iset} \leq 0.8 \times \text{Isc Min MCC5.2}$

$\text{Iset} \leq 0.8 \times 24940$

$\text{Iset} \leq 19952$

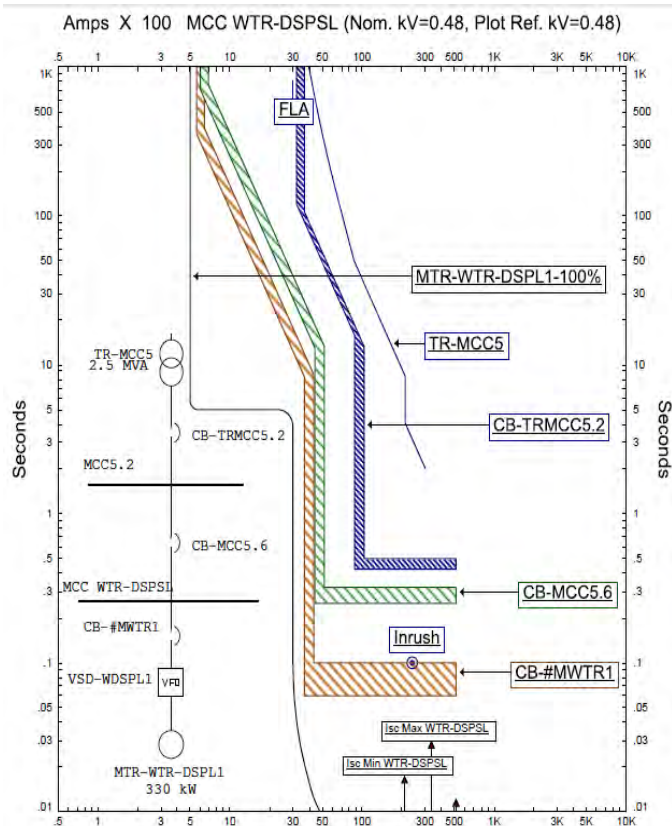
Dipilih Iset = 9600 A,

$$\text{ST Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{9600}{3200} = 3$$

Short Time Band

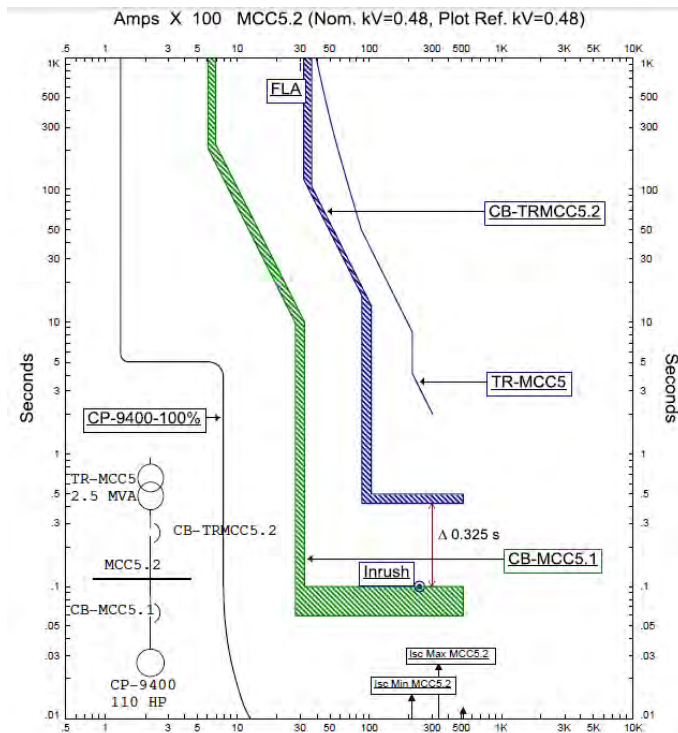
Dipilih ST Band (time delay) = 0.5s

Setelah dilakukan *Resetting*, maka kurva koordinasi pengaman pada tipikal 1 akan menjadi seperti gambar 4.10 dan gambar 4.11 berikut ini:



Gambar 4.10 Kurva Koordinasi *Resetting* Tipikal 1a

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat urutan CB trip sudah benar memenuhi syarat koordinasi pengaman dengan selisih 0.2 detik yakni CB#MWTR1 sebesar 0.1 detik, CB-MCC5.6 sebesar 0.3 detik, dan CB-TRMCC5.2 sebesar 0.5 detik. Sehingga setelah memenuhi koordinasi pengaman yang benar itu lalu dilakukan simulasi *Arc Flash* pada tipikal 1a.



Gambar 4.11 Kurva Koordinasi *Resetting* Tipikal 1b

Hasil dari simulasi *Arc Flash* setelah *Resetting* adalah sebagai berikut seperti terlihat pada tabel 4.5:

Tabel 4.5 Hasil Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting*

Tipikal 1					
ID	Type Bus	Ia (kA)	Incident Energy (cal/cm ²)	Hazard Risk Category	Flash Protection Boundary (ft)
Load Terminal Motor MWTR-DPSL	Cable bus	20.65	7.89	2	3.83

Tabel 4.5 Hasil Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* (Lanjutan)

ID	Type Bus	Ia (kA)	Incident Energy (cal/cm ²)	Hazard Risk Category	Flash Protection Boundary (ft)
Load Terminal Motor CP-9400 110HP	Cable Bus	20.65	7.89	2	3.83
Bus MCC WTR-DPSL	MCC	18.48	19.4	3	8.162
Bus MCC5.2	MCC	18.48	32.4	4	11.142

4.4.2 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi

Resetting Tipikal 1

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada tipikal 1 dengan perhitungan sebagai berikut:

➤ Load terminal Motor MWTR-DPSL

Mencari Ia (*Arcing Current*):

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588V \\ (\lg I_{bf}) - 0,00304G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0,097 + 0,662 \lg (I_{bf}) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 \\ + 0,5588 \times 0,48 \lg (ibf) - 0,00304 \times 13 \lg (ibf)\}$$

$$= \{-0,097 + 0,662 \lg (33,60) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times \\ 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (33,60) - 0,00304 \times 13 \lg (33,60)\}$$

$$= 1,315$$

$$I_a = 20,65 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$E_n = 10^{K1 + K2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G} \\ = 10^{-0,555 - 0,113 + 1,081 \times 1,315 + 0,0011 \times 13} \\ = 5,859$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= 4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{455^2} \right) \\
&= 33.04 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\
&= 7.92 \text{ cal/cm}^2 \\
&\text{Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm} \\
&\text{Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat}
\end{aligned}$$

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= 1169.72 \text{ mm} = 1.16 \text{ m} \\
&= 3.83 \text{ ft}
\end{aligned}$$

➤ Load terminal Motor CP-9400 110HP

Mencari *Ia (Arcing Current)*:

$$\begin{aligned}
\lg Ia &= K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \\
&\quad (\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf}) \\
&= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 \\
&\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (ibf) - 0.00304 \times 13 \lg (ibf)\} \\
&= \{-0.097 + 0.662 \lg (33.60) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\
&\quad 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (33.60) - 0.00304 \times 13 \lg (33.60)\} \\
&= 1.315 \\
Ia &= 20.65 \text{ kA}
\end{aligned}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned}
En &= 10^{K1 + K2 + 1.081 \log(Ia) + 0.0011 G} \\
&= 10^{-0.555 - 0.113 + 1.081 \times 1.315 + 0.0011 \times 13} \\
&= 5.859
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E &= 4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\
&= 4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{455^2} \right) \\
&= 33.04 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\
&= 7.89 \text{ cal/cm}^2 \\
&\text{Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm} \\
&\text{Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat}
\end{aligned}$$

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= 1169.72 \text{ mm} = 1.16 \text{ m} \\
&= 3.83 \text{ ft}
\end{aligned}$$

➤ Bus MCC WTR-DPSL

Mencari *Ia (Arcing Current)*:

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588V \\
(\lg I_{bf}) - 0.00304G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 \\
+ 0.5588 \times 0.48 \lg (ibf) - 0.00304 \times 25 \lg (ibf)\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (33.60) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\
25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (33.60) - 0.00304 \times 25 \lg (33.60)\}$$

$$= 1.266$$

$$I_a = 18.465 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$E_n = 10^{K1 + K2 + 1.081 \log(I_a) + 0.0011G}$$

$$= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 1.266+0.0011 \times 25}$$

$$= 5.346$$

$$E = 4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$= 4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.3}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right)$$

$$= 81.42 \text{ J/cm}^2 \times 0.24$$

$$= 19.54 \text{ cal/cm}^2$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 3 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary*

$$D_B = \left[4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.3}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}}$$

$$= 2487.77 \text{ mm} = 2.48 \text{ m}$$

$$= 8.162 \text{ ft}$$

➤ Bus MCC 5.2

Mencari Ia (*Arcing Current*):

$$\lg Ia = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588V$$

$$(\lg I_{bf}) - 0.00304G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25$$

$$+ 0.5588 \times 0.48 \lg (ibf) - 0.00304 \times 25 \lg (ibf)\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (33.60) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times$$

$$25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (33.60) - 0.00304 \times 25 \lg (33.60)\}$$

$$= 1.266$$

$$Ia = 18.465 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned}E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G} \\&= 10^{-0.555-0.113+1.081\times1.266+0.0011\times25} \\&= 5.346\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\&= 4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.5}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right) \\&= 135.70 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\&= 32.568 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 4 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned}D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\&= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.5}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}} \\&= 3396.08 \text{ mm} = 3.39 \text{ m} \\&= 11.142 \text{ ft}\end{aligned}$$

4.4.3 Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* pada Tipikal 2

Sebelum melakukan simulasi *Arc Flash* pada tipikal 2, dilakukan *Resetting* pada CB MCC1-2.1, CB 2, CB-TE-B, dan CB-ODE sebagai berikut:

- **LVCB-MCC1-2.1**

Manufacturer	: Square-D
Model	: Micrologic
FLA motor	: 276.8 A
Lock Rotor Current (LRC)	: 1660.8 A
Isc min SRU Solution	: 17.67 kA (0.48 kV)

Isc max SRU Solution : 39.66 kA (0.48 kV)
 Sensor : 400
 Rating Plug : 400

Long Time Pick Up

$1.05 \times \text{FLA Motor M-PP1150-A} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor M-PP1150-A}$

$1.05 \times 276.8 < \text{Iset} < 1.3 \times 276.8$

$290.64 < \text{Iset} < 361.84$

Dipilih Iset = 360 A

$$\text{LT Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{360}{400} = 0.9$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 3

Short Time Pick Up

$\text{LRC} \leq \text{Iset} \leq 0,8 \times \text{Isc Min}$

$1660.8 \leq \text{Iset} \leq 0,8 \times 17670$

$1660.8 \leq \text{Iset} \leq 14136$

Dipilih Iset = 2000 A,

$$\text{ST Pick Up} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{2000}{400} = 5$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.1s

• **LVCB 2**

Manufacturer : Square-D
 Model : Micrologic
 FLA Motor total : 803.6 A
 Isc min SRU Solution : 17.67 kA (0.48 kV)
 Isc max SRU Solution : 39.66 kA (0.48 kV)
 Sensor : 1600
 Rating Plug : 1400

Long Time Pick Up

$1.05 \times (\text{Total FLA motor MCC 1-2}) < \text{Iset} < 1.3 \times (\text{Total FLA motor MCC 1-2})$

$$1.05 \times (803.6) < I_{set} < 1.3 \times (803.6)$$

$$823.78 < I_{set} < 1044.68$$

Dipilih $I_{set} = 840 \text{ A}$

$$LT \text{ Pick Up} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{840}{1400} = 0.6$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 2

Short Time Pick Up

$$\text{Total LRC Motor} \leq I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$4942.68 \leq I_{set} \leq 0.8 \times 17670$$

$$4942.68 \leq I_{set} \leq 14136$$

Dipilih $I_{set} = 5600 \text{ A}$,

$$ST \text{ Pick Up} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{5600}{1400} = 4$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.3 s

• LVCB-ODE

Manufacturer	: Square-D
Model	: Micrologic Full SE
FLA Generator Diesel ENG	: 1698 A
Isc Kontribusi min	: 4.82 kA (0.48 kV)
Isc Kontribusi max	: 7.07 kA (0.48 kV)
Sensor	: 1800
Rating Plug	: 1200

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Generator Onan Diesel Eng} < I_{set} < 1.3 \times \text{FLA}$$

Generator Onan Diesel Eng

$$1.05 \times 1698 < I_{set} < 1.3 \times 1698$$

$$1782.9 < I_{set} < 2207.4$$

Dipilih $I_{set} = 1800 \text{ A}$

$$LT \text{ Pick Up} = \frac{I_{set}}{\text{Sensor}} = \frac{1800}{1800} = 1$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 4.5

Short Time Pick Up

$I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ Kontribusi Min}$

$I_{set} \leq 0,8 \times 4820$

$I_{set} \leq 3856$

Dipilih $I_{set} = 2400 \text{ A}$

$$ST \text{ Pick Up} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{2400}{1200} = 2$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.5 s

- **LVCB-TE-B**

Manufacturer	: Square-D
Model	: Micrologic Full SE
FLA Generator TG101-A	: 1132 A
Isc Kontribusi min	: 3.21 kA (0.48 kV)
Isc Kontribusi max	: 4.71 kA (0.48 kV)
Sensor	: 1200
Rating Plug	: 900

Long Time Pick Up

$1.05 \times \text{FLA Generator TG101-B} < I_{set} < 1.3 \times \text{FLA Generator TG101-B}$

$1.05 \times 1132 < I_{set} < 1.3 \times 1132$

$1188.6 < I_{set} < 1471.6$

Dipilih $I_{set} = 1200 \text{ A}$

$$LT \text{ Pick Up} = \frac{I_{set}}{\text{Sensor}} = \frac{1200}{1200} = 1$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 4.5

Short Time Pick Up

$I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ Kontribusi Min}$

$$I_{set} \leq 0,8 \times 3210$$

$$I_{set} \leq 2568$$

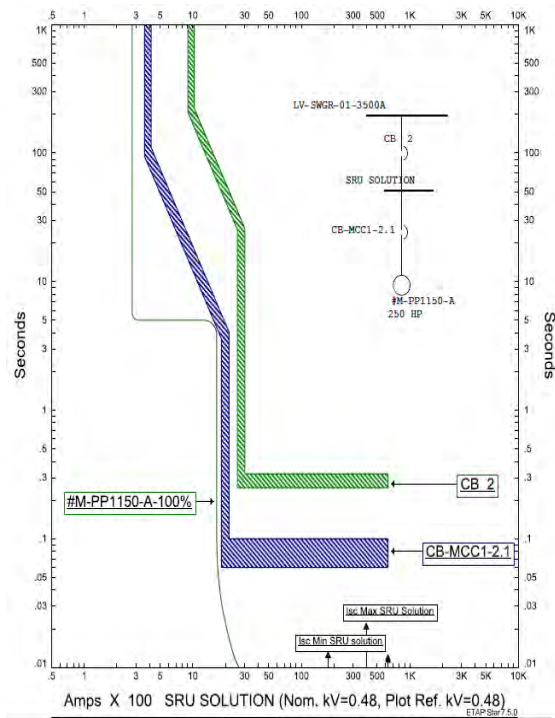
Dipilih $I_{set} = 1800 \text{ A}$,

$$ST \text{ Pick Up} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{1800}{900} = 2$$

Short Time Band

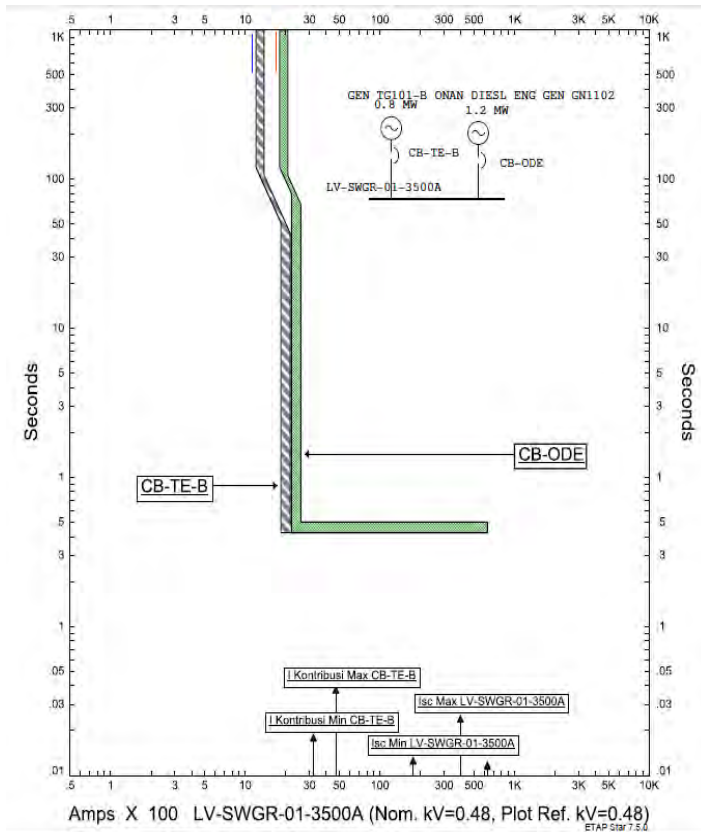
Dipilih $ST \text{ Band (time delay)} = 0.5 \text{ s}$

Setelah dilakukan *resetting*, maka kurva koordinasi pengaman pada tipikal 2 akan menjadi seperti gambar 4.12 untuk tipikal 2a dan gambar 4.13 untuk tipikal 2b dibawah ini:



Gambar 4.12 Kurva Koordinasi *Resetting* tipikal 2a

Dapat dilihat dari gambar 4.12 urutan CB trip sudah benar sesuai syarat koordinasi pengaman dengan *grading time* sebesar 0.2 detik dimana *setting* CB-MCC1-2.1 sebesar 0.1 detik dan CB 2 sebesar 0.3 detik sehingga CB trip berurutan tidak bersamaan.



Gambar 4.13 Kurva Koordinasi *Resetting* tipikal 2b

Hasil dari simulasi *Arc Flash* setelah *Resetting* adalah sebagai berikut seperti terlihat pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Hasil Simulasi *Arc Flash* Tipikal 2 *Resetting*

Tipikal 2					
ID	Type Bus	Ia (kA)	Incident Energy (cal/cm ²)	Hazard Risk Category	Flash Protection-Boundary (ft)
Load Terminal Motor M-PP1150-A	Cable Bus	23.977	9.197	3	4.152
Bus SRU Solution	MCC	21.275	22.5	3	8.956
Bus LV-SWGR-3500-A	Switchgear	19.840	22.2	3	14.451

4.4.4 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 2

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada tipikal 2 dengan perhitungan sebagai berikut:

➤ Load terminal Motor M-PP1150-A 250HP

Mencari Ia (*Arcing Current*):

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0,000526 G + 0.5588V (\lg I_{bf}) - 0,00304G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 13 \lg (I_{bf})\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (39.66) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (39.66) - 0.00304 \times 13 \lg (39.66)\}$$

$$= 1.3798$$

$$Ia = 23.977 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} En &= 10^{K1 + K2 + 1.0811 \log(Ia) + 0.0011G} \\ &= 10^{-0.555 - 0.113 + 1.081 \times 1.3798 + 0.0011 \times 13} \\ &= 6.884 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E &= 4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\
&= 4.184 \times 1.5 \times 6.884 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{455^2} \right) \\
&= 38.828 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\
&= 9.280 \text{ cal/cm}^2 \\
&\quad \text{Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm} \\
&\quad \text{Kategori (NFPA70E 2009) : 3 PPE Cat}
\end{aligned}$$

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4.184 C_f En \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4.184 \times 1.5 \times 6.884 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= 1265.53 \text{ mm} = 1.26 \text{ m} \\
&= 4.152 \text{ ft}
\end{aligned}$$

➤ Bus SRU Solution

Mencari *Ia (Arcing Current)*:

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588V \\
(\lg I_{bf}) - 0.00304G (\lg I_{bf})$$

$$= (-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 25 \lg (I_{bf}))$$

$$= (-0.097 + 0.662 \lg (39.66) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (39.66) - 0.00304 \times 25 \lg (39.66))$$

$$= 1.327$$

$$I_a = 21.275 \text{ kA}$$

Mencari Besar Incident Energy Arc Flash:

$$\begin{aligned}
 E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G} \\
 &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times1.327+0.0011\times25} \\
 &= 6.222
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\
 &= 4.184 \times 1.5 \times 6.222 \times \left(\frac{0.3}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right) \\
 &= 94.77 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\
 &= 22.74 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 3 PPE Cat

Mencari Flash-protection boundary

$$\begin{aligned}
 D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
 &= \left[4.184 \times 1.5 \times 6.222 \times \left(\frac{0.3}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}} \\
 &= 2729.78 \text{ mm} = 2.72 \text{ m} \\
 &= 8.956 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

➤ Bus LV-SWGR-01-3500**Mencari Ia (Arcing Current):**

$$\begin{aligned}
 \lg Ia &= K+0.662 \lg Ibf + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \\
 &\quad (\lg Ibf) - 0.00304G (\lg Ibf) \\
 &= (-0.097 + 0.662 \lg (Ibf) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\
 &\quad 32 + 0.5588 \times 0.48 \lg (Ibf) - 0.00304 \times 32 \lg (Ibf)) \\
 &= (-0.097 + 0.662 \lg (39.66) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\
 &\quad 32 + 0.5588 \times 0.48 \lg (39.66) - 0.00304 \times 32 \lg (39.66)) \\
 &= 1.2975
 \end{aligned}$$

$$I_a = 19.840 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(I_a)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times 1.2975+0.0011\times 32} \\ &= 5.8856 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4.184 \times 1.5 \times 5.8856 \times \left(\frac{0.5}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}} \right) \\ &= 92.345 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 22.16 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 24 inch / 61.0 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 3 PPE Cat

Mencari *Flash-Protection Boundary*

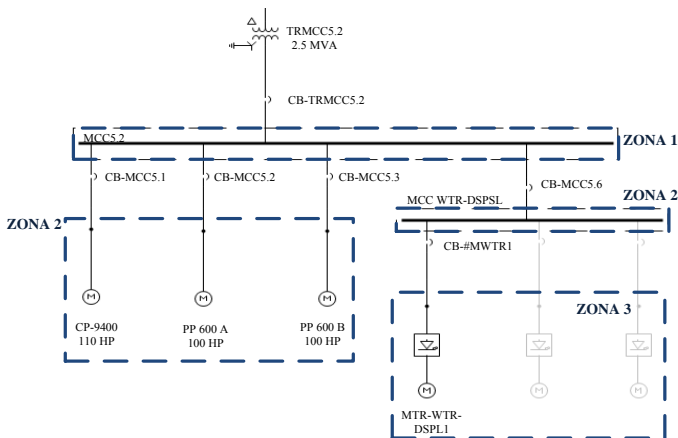
$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.8856 \times \left(\frac{0.5}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.473}} \\ &= 4416.73 \text{ mm} = 4.41 \text{ m} \\ &= 14.468 \text{ ft} \end{aligned}$$

4.5 Simulasi Pengurangan Insiden Energi Arc Flash dengan Teknik Zone Selective Interlocking

Insiden Energi Arc Flash yang terjadi pada kondisi *Resetting* dirasa masih berbahaya terhadap pekerja dan peralatan sehingga perlu dikurangi energinya menggunakan teknik ZSI tanpa mengorbankan koordinasi pengaman yang sudah benar dan sesuai standar. Simulasi dan pengujian teknik *Zone Selective Interlocking* dilakukan menggunakan *Software Easy Power 9.6*. Pemodelan dilakukan di tipikal 1 pada MCC 5 dan tipikal 2 pada MCC1-2 Feeder 4.

4.5.1 Simulasi Pengurangan Insiden Energi Arc Flash dengan Teknik Zone Selective Interlocking pada Tipikal 1

Selanjutnya akan dilakukan pemodelan MCC 5 pada *Software Easy Power* yang terbagi menjadi 3 level zona dengan setting pengaman yang sama dengan kondisi *resetting* untuk mensimulasikan dan mengetahui besar pengurangan insiden energi Arc Flash dengan teknik *Zone Selective Interlocking* seperti terlihat pada gambar 4.14

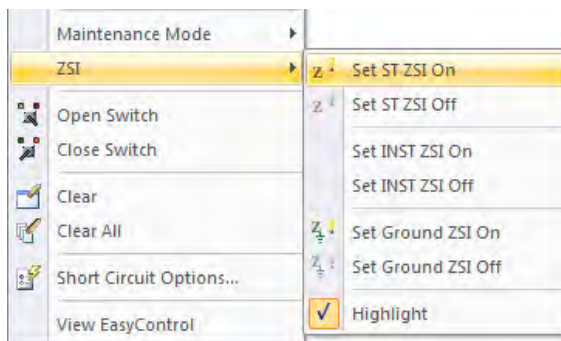


Gambar 4.14 Single Line Diagram MCC 5 pada Easy Power

Untuk dapat menguji kapabilitas dari teknik ZSI, akan dilakukan simulasi gangguan pada 4 kondisi yaitu:

1. Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor MTR-WTR-DSPSL1
2. Kondisi 2 saat terjadi gangguan pada bus MCC WTR-DSPSL
3. Kondisi 3 saat terjadi gangguan pada bus TRMCC5.2
4. Kondisi 4 saat terjadi gangguan pada sisi beban motor CP-9400 110 HP

Selanjutnya teknik ZSI akan diaktifkan untuk mengetahui besar pengurangan insiden energi *Arc Flash* yang terjadi setelah sebelumnya dilakukan pemodelan pada *Trip device/Trip Unit* yang memiliki kapasitas untuk melakukan teknik ZSI. Sesuai data eksisting, *Trip device* yang digunakan adalah *Trip device* micrologic. Untuk itu, kapasitas dan waktu *trip* ZSI disesuaikan dengan *manufacture* dari *Trip device* micrologic yaitu Square-D. Untuk mengaktifkan kerja ZSI pada *software Easy Power* 9.6 dapat dilihat pada gambar 4.15



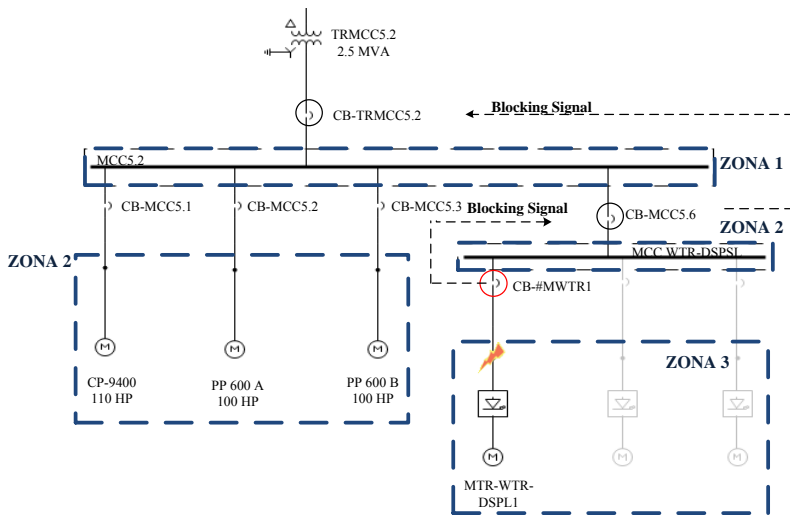
Gambar 4.15 Fitur ZSI pada *Software Easy Power*

Sesuai dengan prinsip kerja ZSI bahwa keputusan untuk *trip* dengan atau tanpa delay tergantung pada lokasi gangguan dan *blocking* signal dimana saat terjadi gangguan maka CB yang merasakan akan mengirim sinyal *blocking* kepada CB atasnya untuk menahan waktu ZSI nya serta mengaktifkan *preset time delay* nya, sedangkan CB yang merasakan gangguan namun tidak menerima sinyal *blocking* akan *trip* tanpa delay

sesuai waktu ZSI. Sehingga semakin cepat CB bekerja maka insiden energi *Arc Flash* akan semakin kecil dan dapat meminimalisir bahaya bagi pekerja serta peralatan.

a. Gangguan pada Kondisi 1

Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor MTR-WTR-DSPSL1 seperti terlihat pada gambar 4.16.

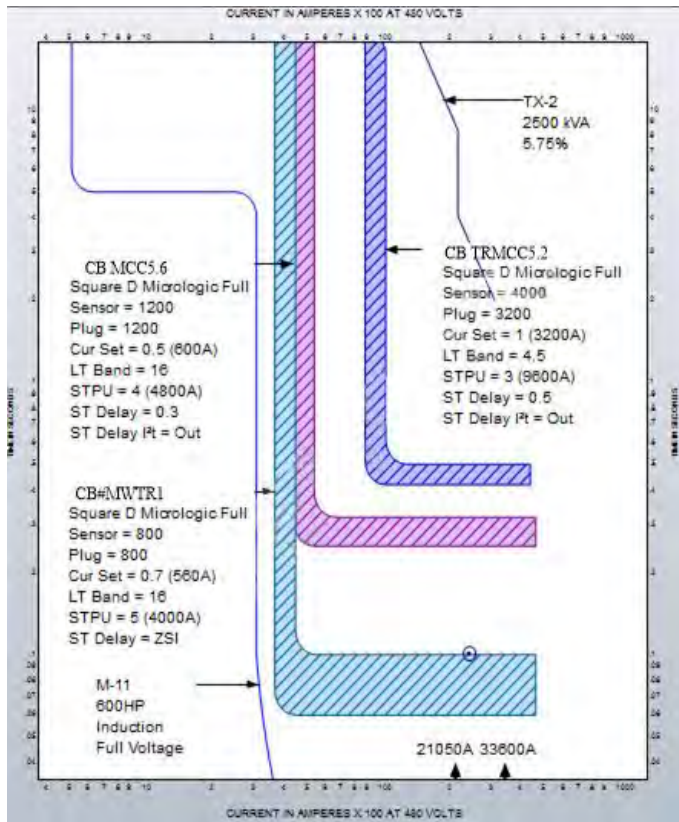


Gambar 4.16 Gangguan pada Kondisi 1

Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada zona 3 di sisi terminal beban motor MTR-WTR-DSPSL1, maka terdapat 3 CB pada level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan, yakni CB-#MWTR1, CB-MCC5.6, dan CB-TRMCC5.2.

CB #MWTR1 mengirim sinyal *blocking* kepada CB-MCC5.6 untuk menahan waktu *trip* ZSI CB-MCC5.6 sehingga CB-MCC5.6 menjadi *back up* CB#MWTR1 dengan *delay time* sebesar 0.3 detik. Dalam waktu yang bersamaan juga CB-MCC5.6 mengirim sinyal *blocking* kepada CB atasnya CB-TRMCC5.2 untuk menahan waktu *trip* ZSI CB-TRMCC5.2 sehingga CB-TRMCC5.2 juga menjadi *back up* dengan *delay time* yang lebih lama sebesar 0.5 detik.

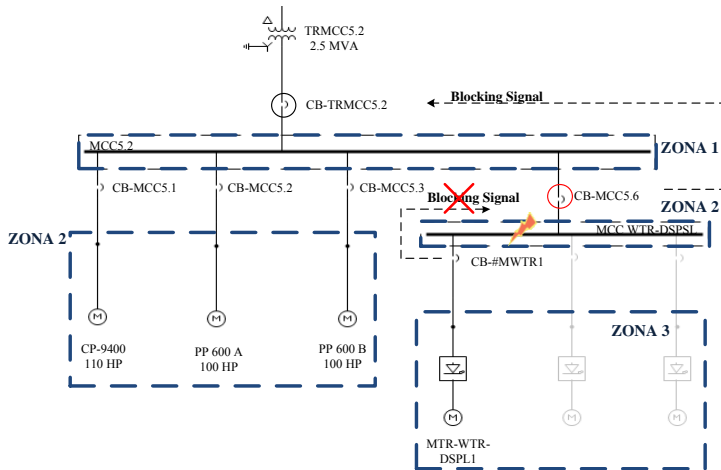
CB-#MWTR1 karena merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB lain, maka CB-#MWTR1 *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* micrologic. Seperti terlihat pada gambar 4.17 TCC *Easy Power* saat gangguan kondisi 1.



Gambar 4.17 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 1

b. Gangguan pada Kondisi 2

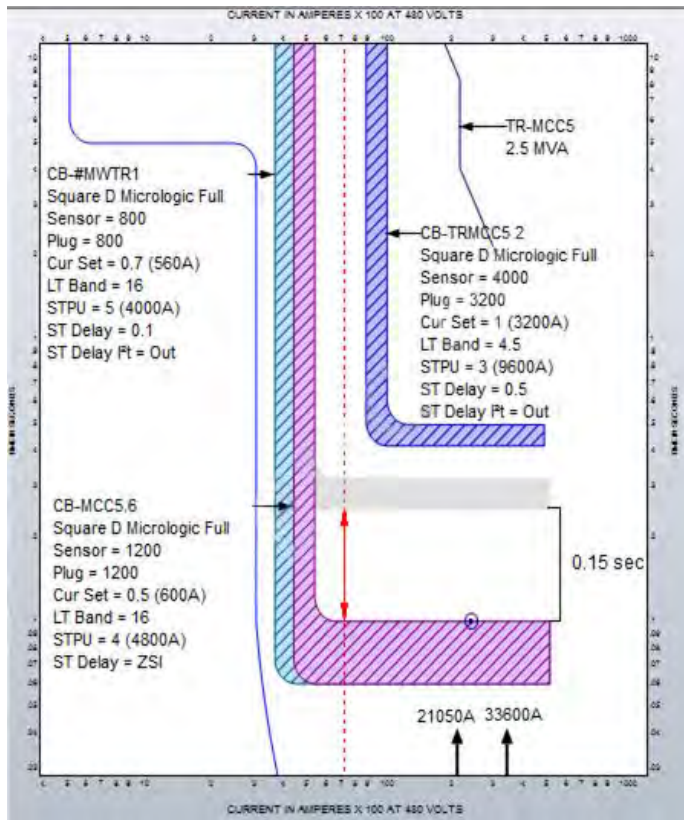
Kondisi 2 adalah saat terjadi gangguan pada bus MCC WTR-DSPSL seperti terlihat pada gambar 4.18



Gambar 4.18 Gangguan pada Kondisi 2

Kondisi 2 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 di bus MCC WTR-DSPSL, maka terdapat 2 CB dengan level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan yaitu CB-MCC5.6 untuk zona 2 dan CB-TRMCC5.2 untuk zona 1.

CB MCC5.6 mengirim sinyal *blocking* kepada CB-TRMCC5.2 untuk menahan waktu *trip* ZSI CB-TRMCC5.2 sehingga CB-TRMCC5.2 menjadi *back up* MCC5.6 dengan *delay time* sebesar 0.5 detik. Sedangkan CB-#MWTR1 yang tidak merasakan gangguan pada daerah pengamanannya pada zona 3, tidak mengirim sinyal *blocking* kepada CB atasnya. Karena CB-MCC5.6 merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB lain, maka CB-MCC5.6 *Trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device micrologic*. Seperti terlihat pada gambar 4.19 TCC Easy Power saat gangguan kondisi 2.

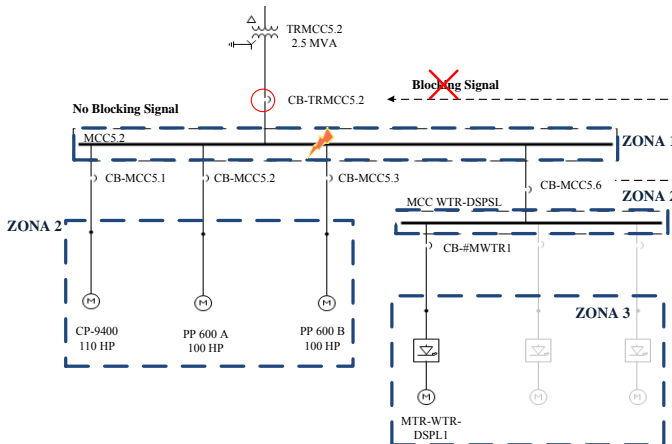


Gambar 4.19 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 2

CB-MCC5.6 *trip* dengan waktu ZSI dan terjadi perubahan kurva pengaman dari CB-MCC5.6 dimana selisih perubahannya adalah sebesar 0.15 detik dari kurva awalnya sebelum menggunakan metode ZSI pada gangguan kondisi 2.

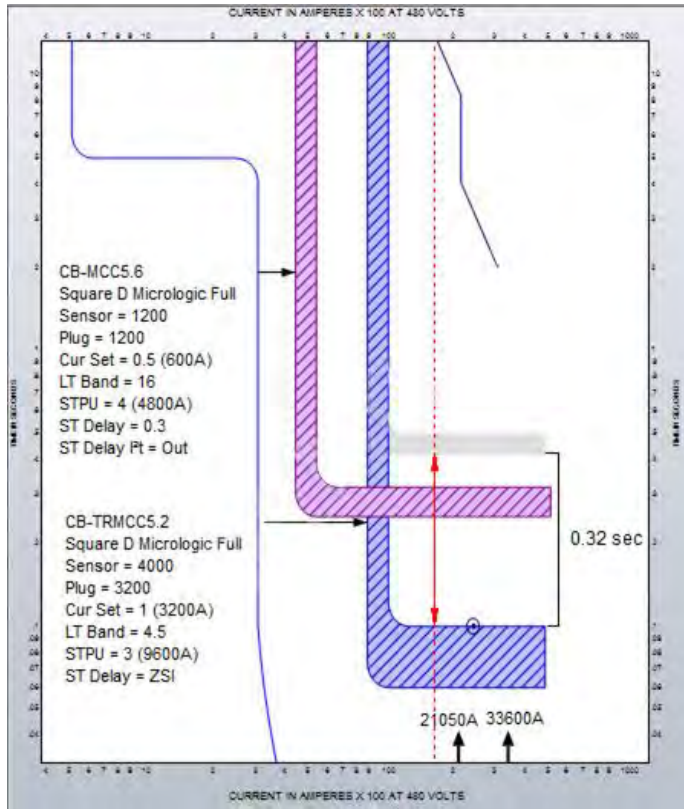
c. Gangguan pada Kondisi 3

Kondisi 3 saat terjadi gangguan pada bus TRMCC5.2 seperti terlihat pada gambar 4.20



Gambar 4.20 Gangguan pada Kondisi 3

Kondisi 3 adalah saat terjadi gangguan pada zona 1 di bus MCC5.2, maka terdapat 1 CB yang merasakan gangguan yaitu CB-TRMCC5.2 untuk zona 1. CB-TRMCC5.2 sebagai pengaman terakhir sebelum trafo maka CB-TRMCC5.2 diset tidak mengirim sinyal *blocking* kepada CB lain. Sedangkan CB-MCC5.6 karena tidak merasakan gangguan pada daerah pengamanannya di zona 2, maka tidak mengirim sinyal *blocking* ke pengaman atasnya CB-TRMCC5.2. Karena CB-TRMCC5.2 merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB lain maka CB-TRMCC5.2 *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* micrologic. Seperti terlihat pada gambar 4.21 TCC Easy Power saat gangguan kondisi 3.

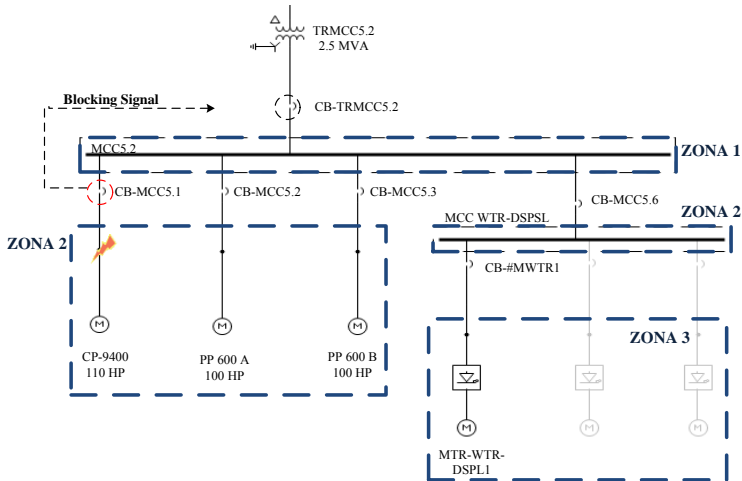


Gambar 4.21 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 3

CB-TRMCC5.2 trip dengan waktu ZSI dan terjadi perubahan kurva pengaman dari CB-TRMCC5.2 dimana selisih perubahannya adalah sebesar 0.32 detik dari kurva awalnya sebelum menggunakan metode ZSI pada gangguan kondisi 3.

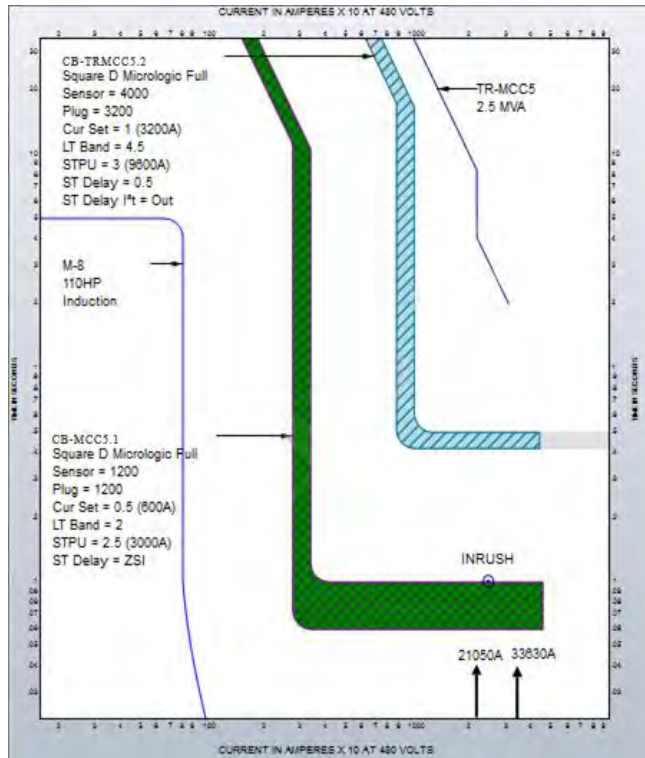
d. Gangguan pada Kondisi 4

Kondisi 4 saat terjadi gangguan pada sisi beban motor CP-9400 110 HP seperti terlihat pada gambar 4.22



Gambar 4.22 Gangguan pada Kondisi 4

Kondisi 4 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 sisi terminal beban motor CP-9400 110HP, maka terdapat 2 CB yang berada pada level zona berbeda merasakan adanya gangguan yaitu CB-MCC5.1 untuk zona 2 dan CB-TRMCC5.2 untuk zona 1. CB MCC5.1 mengirim sinyal *blocking* kepada CB-TRMCC5.2 untuk menahan waktu *trip* ZSI CB-TRMCC5.2 sehingga CB-TRMCC5.2 menjadi *back up* CB MCC5.1 dengan *delay time* sebesar 0.5 detik. Karena CBMCC5.1 merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB lain, maka CB-MCC5.1 *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* micrologic. Seperti terlihat pada gambar 4.23 TCC Easy Power saat gangguan kondisi 4.



Gambar 4.23 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 4

Setelah disimulasikan gangguan pada 4 kondisi, terlihat bahwa terjadi perubahan kurva pengaman sesuai dengan lokasi gangguannya dan ZSI dapat mengamankan gangguan dengan cepat dan selektif dimana yang mengamankan gangguan adalah CB terdekat dari lokasi gangguan. Dengan cepatnya mengamankan gangguan maka insiden energi *Arc Flash* yang terjadi bisa berkurang.

Hasil Simulasi perhitungan insiden energi tipikal 1 menggunakan ZSI dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut ini:

Tabel 4.7 Hasil Simulasi *Arc Flash* Tipikal 1 teknik ZSI

Tipikal 1					
ID	Type Bus	Ia (kA)	Incident Energy (cal/cm ²)	Hazard Risk Category	Flash Protection Boundary (ft)
Load Terminal Motor MWTR-DPSL	Cable Bus	20.65	7.84	2	3.83
Load Terminal Motor CP-9400 110HP	Cable Bus	20.65	7.84	2	3.83
Bus MCC WTR-DPSL	MCC	18.479	6.5	2	4.179
Bus MCC5.2	MCC	18.479	6.5	2	4.179

4.5.2 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* setelah penerapan Teknik ZSI pada Tipikal 1

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada MCC 5 adalah sebagai berikut:

➤ Load terminal Motor MWTR-DPSL

Mencari Ia (Arcing Current):

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588V (\lg I_{bf}) - 0,00304G (\lg I_{bf})$$

$$= -0,097 + 0,662 \lg (I_{bf}) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (I_{bf}) - 0,00304 \times 13 \lg (I_{bf})$$

$$= -0,097 + 0,662 \lg (33,60) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (33,60) - 0,00304 \times 13 \lg (33,60)$$

$$= 1,315$$

$$Ia = 20,65 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned}
 E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia) + 0.0011G} \\
 &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times 1.315+0.0011\times 13} \\
 &= 5.859
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\
 &= 4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{455^2} \right) \\
 &= 33.04 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\
 &= 7.89 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned}
 D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
 &= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= 1169.72 \text{ mm} = 1.16 \text{ m} \\
 &= 3.83 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

➤ Load terminal Motor CP-9400 110HP**Mencari Ia (Arcing Current):**

$$\begin{aligned}
 \lg Ia &= K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V (\\
 &\quad \lg I_{bf}) - 0.00304G (\lg I_{bf}) \\
 &= -0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + \\
 &\quad 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 13 \lg (I_{bf}) \\
 &= -0.097 + 0.662 \lg (33.60) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\
 &\quad 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (33.60) - 0.00304 \times 13 \lg (33.60) \\
 &= 1.315
 \end{aligned}$$

$$I_a = 20.65 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times1.315+0.0011\times13} \\ &= 5.859 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{455^2} \right) \\ &= 33.04 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 7.89 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.859 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 1169.72 \text{ mm} = 1.16 \text{ m} \\ &= 3.83 \text{ ft} \end{aligned}$$

➤ Bus MCC WTR-DPSL

Mencari *Ia (Arcing Current)*:

$$\begin{aligned} \lg I_a &= K+0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588V \\ &\quad (\lg I_{bf}) - 0.00304G (\lg I_{bf}) \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 \\ &\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 25 \lg (I_{bf})\} \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (33.60) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (33.60) - 0.00304 \times 25 \lg (33.60)\} \end{aligned}$$

$$= 1.266$$

$$I_a = 18.465 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$E_n = 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G}$$

$$= 10^{-0.555-0.113+1.081\times 1.266+0.0011\times 25}$$

$$= 5.346$$

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$= 4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right)$$

$$= 27.14 \text{ J/cm}^2 \times 0.24$$

$$= 6.51 \text{ cal/cm}^2$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary*

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}}$$

$$= 1273.75 \text{ mm} = 1.27 \text{ m}$$

$$= 4.179 \text{ ft}$$

➤ **Bus MCC 5.2**

Mencari *Ia (Arcing Current)*:

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V$$

$$(\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25$$

$$+ 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 25 \lg (I_{bf})\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg(33.60) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg(33.60) - 0.00304 \times 25 \lg(33.60)\}$$

$$= 1.266$$

$$I_a = 18.465 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 1.266+0.0011 \times 25} \\ &= 5.346 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right) \\ &= 27.14 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 6.51 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch / 45.5 cm

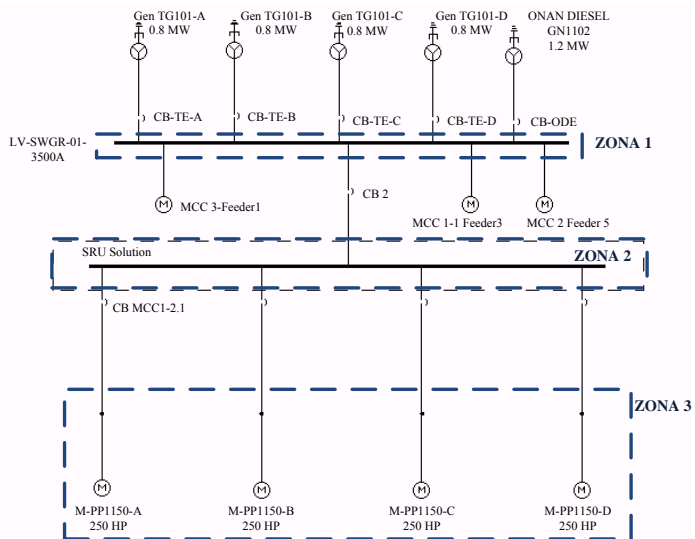
Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.346 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}} \\ &= 1273.75 \text{ mm} = 1.27 \text{ m} \\ &= 4.179 \text{ ft} \end{aligned}$$

4.5.3 Simulasi Pengurangan Insiden Energi *Arc Flash* dengan Teknik *Zone Selective Interlocking* pada Tipikal 2

Selanjutnya dilakukan pemodelan MCC 1-2 Feeder 4 pada *Software Easy Power* yang terbagi menjadi 3 level zona gangguan dengan *setting* pengaman yang sama dengan kondisi *resetting* seperti terlihat pada gambar 4.24. Dengan tujuan untuk mensimulasikan dan mengetahui besar pengurangan insiden energi *Arc Flash* dengan teknik *Zone Selective Interlocking*



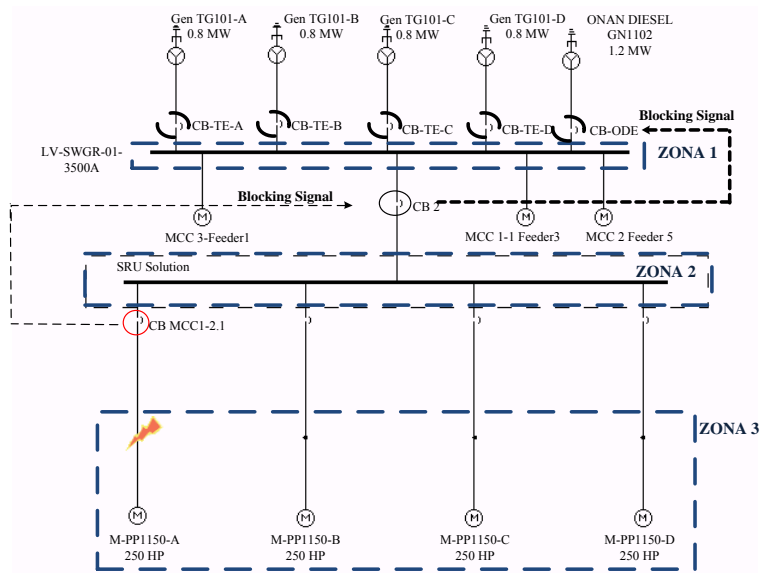
Gambar 4.24 Single Line Diagram MCC 1-2 feeder 4 pada *Easy Power*

Untuk menguji kapabilitas teknik ZSI, maka dilakukan simulasi gangguan pada 3 kondisi yaitu:

- Kondisi 1 saat terjadi gangguan pada sisi beban motor M-PP1150-A
- Kondisi 2 saat terjadi gangguan pada bus SRU Solution
- Kondisi 3 saat terjadi gangguan pada bus LV-SWGR-01-3500A

a. Gangguan pada Kondisi 1

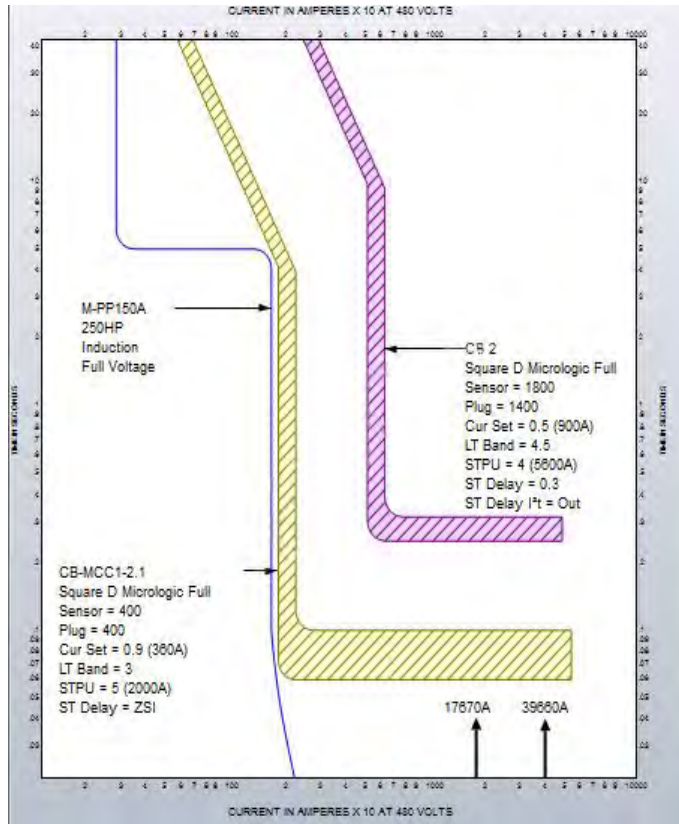
kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor M-PP1150-A seperti terlihat pada gambar 4.25



Gambar 4.25 Gangguan pada Kondisi 1

Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada zona 3 di sisi terminal beban motor M-PP1150-A 250 HP, maka pengamanan-pengaman yang bertugas mengamankan gangguan pada zona 1 dan 2 ikut merasakan adanya gangguan, yakni CB 2 untuk zona 2, serta semua pengaman generator yang berada pada zona 1. CB MCC1-2.1 mengirim sinyal *blocking* kepada CB-2 untuk menahan waktu *trip* ZSI CB-2 sehingga CB-2 menjadi *back up* CB MCC1-2.1 dengan *delay time* sebesar 0.3 detik. Dalam waktu yang bersamaan juga CB-2 mengirim sinyal *blocking* kepada CB yang berada pada zona 1 untuk menahan waktu *trip* ZSI pengaman generator tersebut sehingga pengaman generator juga menjadi *back up* dengan *delay time* yang lebih lama sebesar 0.5 detik. CB- MCC1-2.1 karena merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB

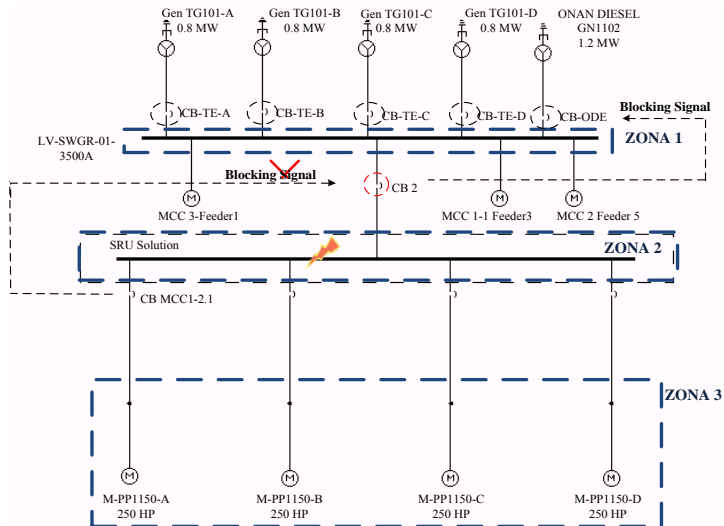
lain, maka CB MCC1-2.1 *Trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip* device micrologic. Seperti terlihat pada gambar 4.26 TCC *Easy Power*.



Gambar 4.26 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 1

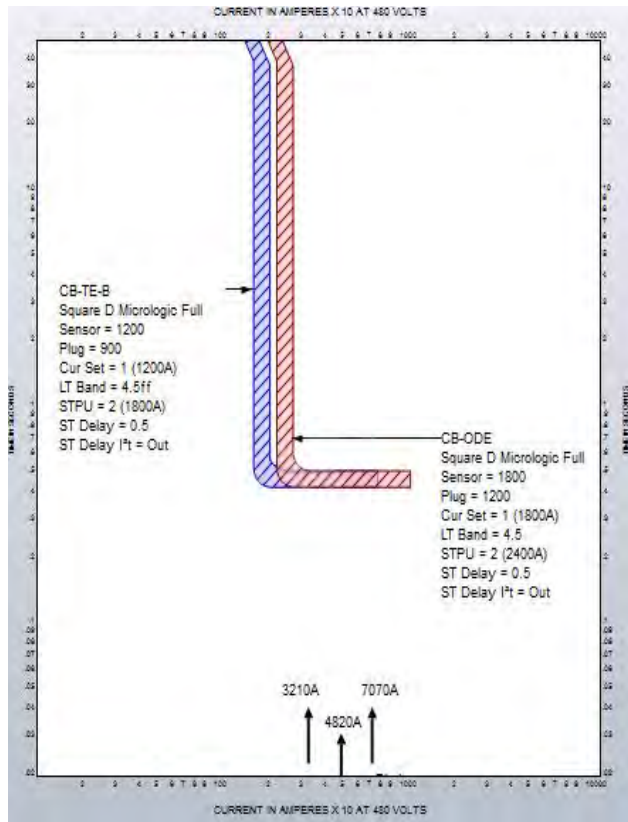
b. Gangguan pada Kondisi 2

Kondisi 2 saat terjadi gangguan pada bus SRU Solution seperti terlihat pada gambar 4.27



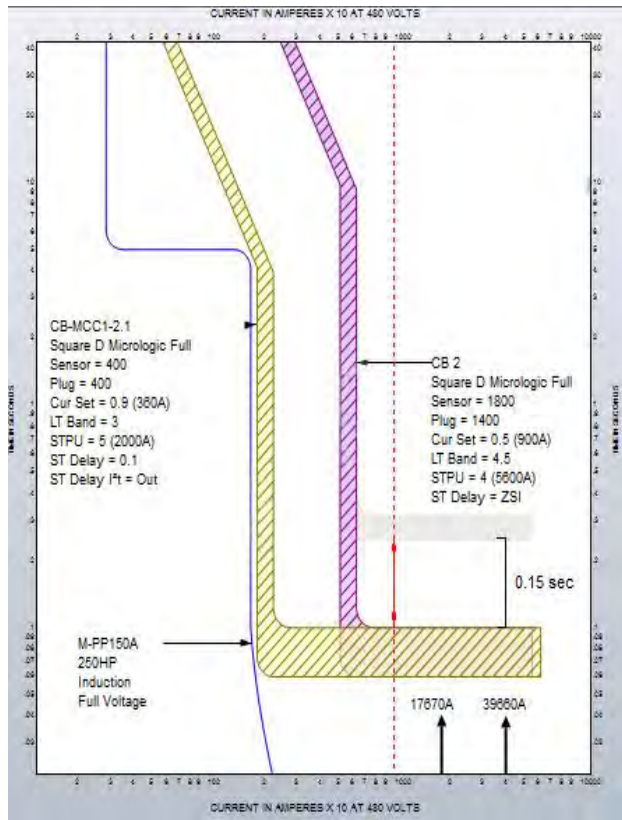
Gambar 4.27 Gangguan pada Kondisi 2

Kondisi 2 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 yakni pada bus SRU SOLUTION, maka semua pengaman generator yang mengamankan zona 1 dan CB 2 yang mengamankan zona 2 merasakan gangguan. CB 2 mengirim sinyal *blocking* kepada pengaman atasnya untuk menahan waktu *trip* ZSI nya sehingga semua pengaman generator akan menjadi *back up* CB 2 dengan *delay time* sebesar 0.5 detik seperti terlihat pada gambar 4.28 TCC Generator saat kondisi 2. Sedangkan CB MCC1-2.1 yang tidak merasakan gangguan pada daerah pengamannya zona 3 tidak mengirim sinyal *blocking* kepada pengaman atasnya CB 2. Karena CB 2 merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB lain maka CB 2 *Trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *Trip device* micrologic. Seperti terlihat pada gambar 4.29 TCC Easy Power saat gangguan kondisi 2.



Gambar 4.28 TCC Generator saat Gangguan Kondisi 2

CB-TE-B dan CB-ODE sebagai pengaman generator tidak mengalami perubahan kurva dikarenakan mendapat *blocking signal* dan menjadi *back up* dengan *delay time* sebesar 0.5 detik.

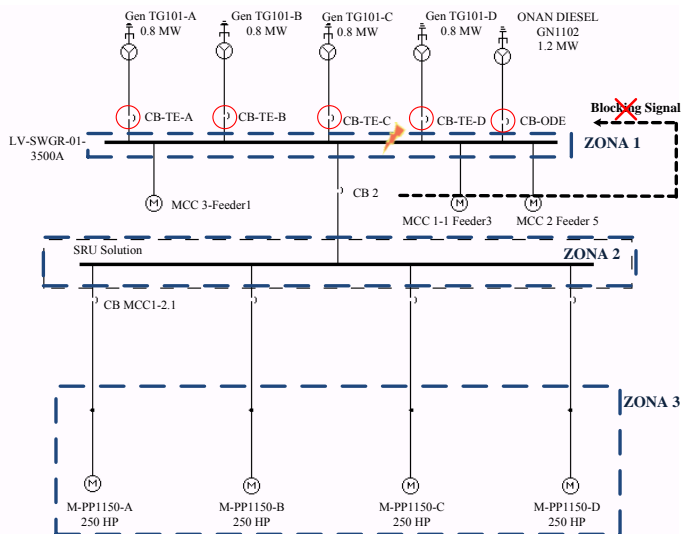


Gambar 4.29 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 2

Sedangkan CB 2 *trip* dengan waktu ZSI dan terjadi perubahan kurva pengaman dari CB 2 dimana selisih perubahannya adalah sebesar 0.15 detik dari kurva awalnya sebelum menggunakan metode ZSI pada gangguan kondisi 2.

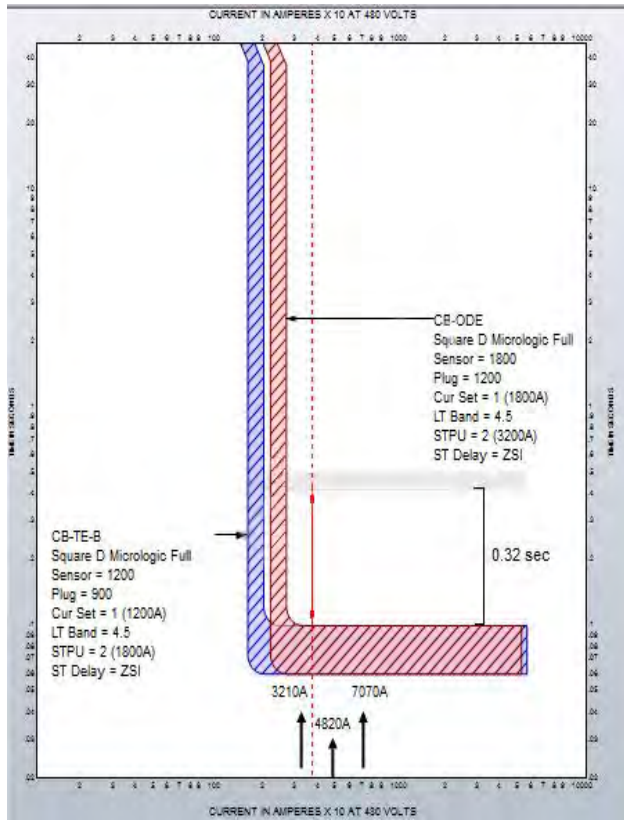
c. Gangguan pada Kondisi 3

Kondisi 3 saat terjadi gangguan pada bus LV-SWGR-01-3500A seperti terlihat pada gambar 4.30



Gambar 4.30 Gangguan pada Kondisi 3

Kondisi 3 adalah saat terjadi gangguan pada zona 1 yaitu bus LV-SWGR-01-3500A, maka semua pengaman generator pada zona 1 yaitu CB-TE-A, CB-TE-B, CB-TE-C, CB-TE-D, CB-ODE merasakan gangguan pada daerah pengamanannya. Pengaman generator sebagai pengaman terakhir diset tidak mengirim sinyal *blocking* kepada CB lain. Sedangkan CB-2 tidak merasakan gangguan pada daerah pengamanannya di zona 2 sehingga tidak mengirim sinyal *blocking* ke pengaman generator. Karena semua pengaman generator merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking* dari CB lain maka semua pengaman generator *Trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* micrologic. Seperti terlihat pada gambar 4.31 TCC Easy Power saat gangguan kondisi 3.



Gambar 4.31 TCC pada *Easy Power* saat Gangguan Kondisi 3

CB-TE-B dan CB-ODE sebagai pengaman generator *trip* dengan waktu ZSI dan terjadi perubahan kurva pengaman dari CB-TE-B dan CB-ODE dimana selisih perubahannya adalah sebesar 0.32 detik dari kurva awalnya sebelum menggunakan metode ZSI pada gangguan kondisi 3.

Hasil simulasi Teknik ZSI pada *Software Easy Power* dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut ini:

Tabel 4.8 Hasil Simulasi *Arc Flash* MCC 1-2 Feeder 4 dengan Teknik ZSI pada *Easy Power*

Tipikal 2					
ID	Type Bus	Ia (kA)	Incident Energy (cal/cm ²)	Hazard Risk Category	Flash Protection-Boundary (ft)
Load Terminal Motor M-PP1150-A	Cable Bus	23.977	9.197	3	4.152
Bus SRU Solution	MCC	21.275	7.5	2	4.585
Bus LV-SWGR-3500-A	Switchgear	19.840	4.4	2	4.846

4.5.4 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* setelah penerapan Teknik ZSI pada Tipikal 2

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada MCC 1-2 Feeder 4 adalah sebagai berikut:

➤ Load terminal Motor M-PP1150-A 250HP

Mencari Ia (Arcing Current):

$$I_g I_a = K + 0,662 I_g I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (I_g I_{bf}) - 0,00304 G (I_g I_{bf})$$

$$= -0,097 + 0,662 I_g (I_{bf}) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 + 0,5588 \times 0,48 I_g (I_{bf}) - 0,00304 \times 13 I_g (I_{bf})$$

$$= -0,097 + 0,662 I_g (39,66) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 + 0,5588 \times 0,48 I_g (39,66) - 0,00304 \times 13 I_g (39,66)$$

$$= 1,3798$$

$$I_a = 23,977 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times 1.3798+0.0011\times 13} \\ &= 6.884 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4.184 \times 1.5 \times 6.884 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{455^2} \right) \\ &= 38.828 \text{ J/cm}^2 \\ &= 9.280 \text{ cal/cm}^2 \\ \text{Jarak kerja} &: 18 \text{ inch} / 45.5 \text{ cm} \\ \text{Kategori (NFPA70E 2009)} &: 3 \text{ PPE Cat} \end{aligned}$$

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1.5 \times 6.884 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 1265.53 \text{ mm} = 1.26 \text{ m} \\ &= 4.152 \text{ ft} \end{aligned}$$

➤ **Bus SRU Solution**

Mencari Ia (*Arcing Current*):

$$\begin{aligned} \lg Ia &= K + 0.662 \lg Ibf + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \\ &\quad (\lg Ibf) - 0.00304G (\lg Ibf) \\ &= (-0.097 + 0.662 \lg (Ibf) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (Ibf) - 0.00304 \times 25 \lg (Ibf)) \\ &= (-0.097 + 0.662 \lg (39.66) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (39.66) - 0.00304 \times 25 \lg (39.66)) \\ &= 1.327 \end{aligned}$$

$$I_a = 21.275 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(I_a)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times1.327+0.0011\times25} \\ &= 6.222 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^X}{D^X} \right) \\ &= 4.184 \times 1.5 \times 6.222 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right) \\ &= 31.58 \text{ J/cm}^2 \\ &= 7.58 \text{ cal/cm}^2 \\ \text{Jarak kerja} &: 18 \text{ inch} / 45.5 \text{ cm} \\ \text{Kategori (NFPA70E 2009)} &: 2 \text{ PPE Cat} \end{aligned}$$

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^X}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{X}} \\ &= \left[4.184 \times 1.5 \times 6.222 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}} \\ &= 1399.10 \text{ mm} = 1.39 \text{ m} \\ &= 4.590 \text{ ft} \end{aligned}$$

➤ **Bus LV-SWGR-01-3500**

Mencari *Ia (Arcing Current)*:

$$\begin{aligned} \lg I_a &= K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588V \\ &\quad (\lg I_{bf}) - 0.00304G (\lg I_{bf}) \\ &= (-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 32 + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 32 \lg (I_{bf})) \\ &= (-0.097 + 0.662 \lg (39.66) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 32 + 0.5588 \times 0.48 \lg (39.66) - 0.00304 \times 32 \lg (39.66)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.2975 \\
 I_a &= 19.840 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned}
 E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(I_a)+0.0011G} \\
 &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times 1.2975+0.0011\times 32} \\
 &= 5.8856
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E &= 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\
 &= 4.184 \times 1.5 \times 5.8856 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}} \right) \\
 &= 18.469 \text{ J/cm}^2 \\
 &= 4.412 \text{ cal/cm}^2 \\
 \text{Jarak kerja} &: 24 \text{ inch} / 61.0 \text{ cm} \\
 \text{Kategori (NFPA70E 2009)} &: 2 \text{ PPE Cat}
 \end{aligned}$$

Mencari *Flash-protection boundary*

$$\begin{aligned}
 D_B &= \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
 &= \left[4.184 \times 1.5 \times 5.8856 \times \left(\frac{0.1}{0.2} \right) \left(\frac{610^{1.473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.473}} \\
 &= 1481.08 \text{ mm} = 1.48 \text{ m} \\
 &= 4.859 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

4.6 Perbandingan Insiden Energi Arc Flash Resetting dan ZSI

Hasil perbandingan insiden energy Arc Flash antara kondisi *Resetting* dengan menggunakan teknik ZSI dapat dilihat pada tabel 4.9 dan tabel 4.10 berikut ini:

Tabel 4.9 Perbandingan Arc Flash Kondisi *Resetting* dan ZSI MCC 5

MCC 5		<i>Resetting</i>	ZSI
Load Terminal Motor MWTR- DPSL	Ia (kA)	20.65	20.65
	FCT (s)	0.1	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	7.89	7.89
	Hazard Category	2	2
	Working Distance (inch)	18	18
Load Terminal Motor CP-9400 110HP	Ia (kA)	20.65	20.65
	FCT (s)	0.1	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	7.89	7.89
	Hazard Category	2	2
	Working Distance (inch)	18	18
Bus MCC WTR- DPSL	Ia (kA)	18.48	18.48
	FCT (s)	0.3	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	19.4	6.5
	Hazard Category	3	2
	Working Distance (inch)	18	18
Bus MCC5.2	Ia(kA)	18.48	18.48
	FCT (s)	0.5	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	32.4	6.5
	Hazard Category	4	2
	Working Distance (inch)	18	18

Tabel 4.10 Perbandingan *Arc Flash* Kondisi *Resetting* dan ZSI
MCC 1-2

MCC 1-2 Feeder 4		Resetting	ZSI
Load Terminal Motor M-PP1150- A 250HP	Ia (kA)	23.977	23.977
	FCT (s)	0.1	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	9.197	9.197
	Hazard Category	3	3
	Working Distance (inch)	18	18
Bus SRU Solution	Ia (kA)	21.275	21.275
	FCT (s)	0.3	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	22.5	7.5
	Hazard Category	3	2
	Working Distance (inch)	18	18
LV-SWGR-01- 3500	Ia (kA)	19.84	19.84
	FCT (s)	0.5	0.1
	Incident Energy (cal/cm ²)	22.2	4.4
	Hazard Category	3	2
	Working Distance (inch)	24	24

Terlihat dari tabel 4.9 dan tabel 4.10 dengan menggunakan teknik ZSI terjadi pengurangan insiden energi *Arc Flash* sebesar:

1. Bus MCC WTR-DPSL sebesar 66.5% dari 19.4 cal/cm² menjadi 6.5 cal/cm²
2. Bus MCC5.2 sebesar 79.93% dari 32.4 cal/cm² menjadi 6.5 cal/cm²
3. Bus SRU Solution sebesar 66.67% dari 22.5 cal/cm² menjadi 7.5 cal/cm²
4. Bus LV-SWGR-01-3500A sebesar 80.18% dari 22.2 cal/cm² menjadi 4.4 cal/cm²

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

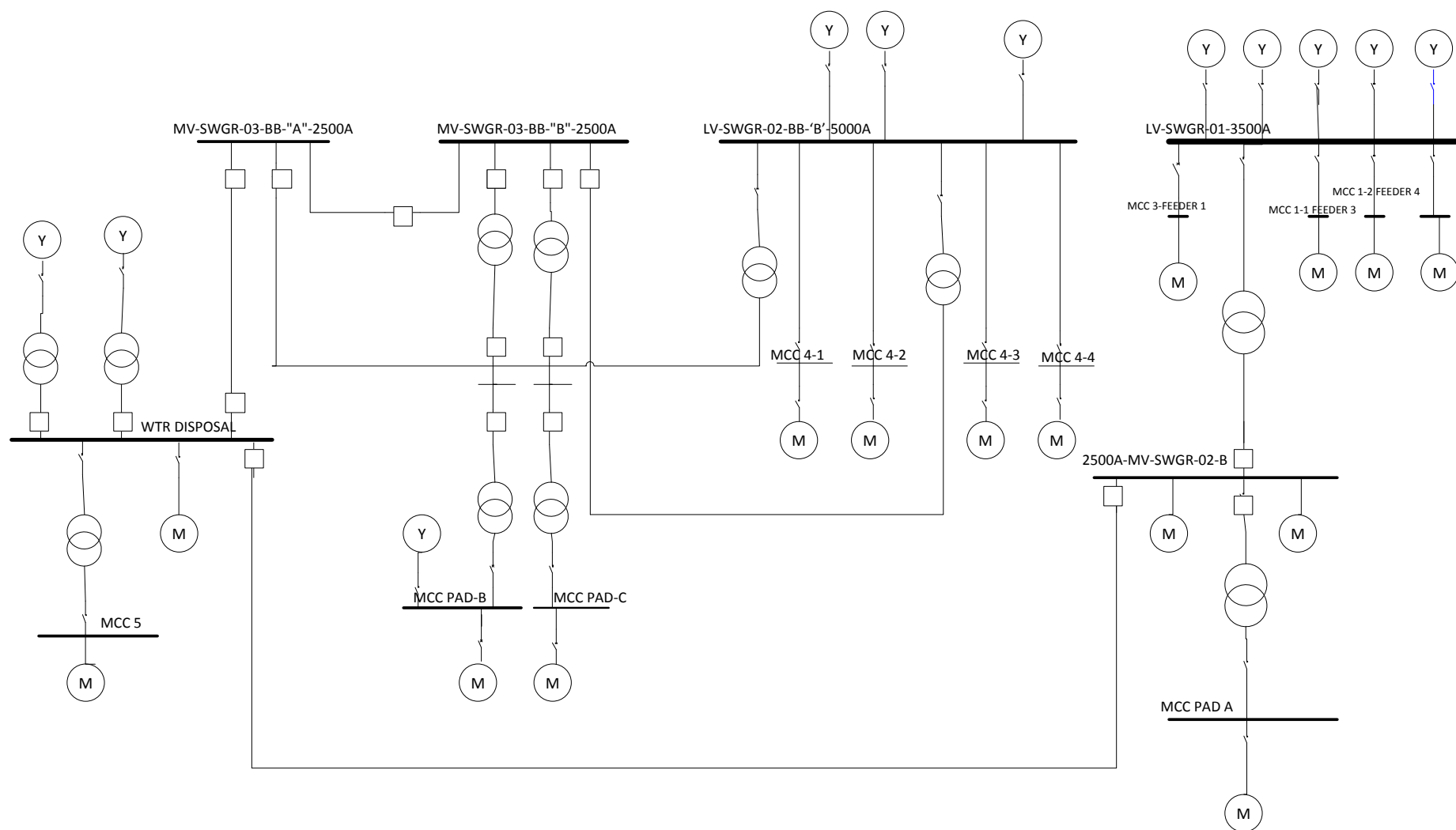
Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Dari hasil *running* simulasi dengan *software* ETAP 7.5 dapat diketahui bahwa nilai insiden energi *Arc Flash* bus tegangan rendah 0.48 kV di Plant CPA JOB-PPEJ kondisi *existing* memang kecil namun pengamannya tidak sesuai standar koordinasi pengaman yang benar.
2. Insiden energi *Arc Flash* saat kondisi *resetting* masih berbahaya sehingga perlu dilakukan pengurangan insiden energi tersebut agar dapat meningkatkan keselamatan bagi pekerja serta tidak merusak peralatan.
3. Dari hasil simulasi dengan *software* Easy Power, dapat diketahui bahwa metode ZSI mampu mengurangi insiden energi *Arc Flash* dengan efektif dan efisien tanpa mengorbankan koordinasi pengaman yang ada.
4. Metode ZSI lebih efektif dan efisien dalam mengamankan dan mengurangi insiden energi *Arc Flash* dibanding dengan penggunaan rele bus differensial yang membutuhkan CT (*Current Transformer*) yang banyak serta ruang yang lebih besar.
5. *Zone Selective Interlocking* mampu mengurangi insiden energi *Arc Flash* yang terjadi. Pengurangan insiden energi ini terjadi pada bus-bus sebagai berikut:
 - a. Bus MCC WTR-DPSL sebesar 66.5% dari 19.4 cal/cm² menjadi 6.5 cal/cm²
 - b. Bus MCC5.2 sebesar 79.93% dari 32.4 cal/cm² menjadi 6.5 cal/cm²
 - c. Bus SRU Solution sebesar 66.67% dari 22.5 cal/cm² menjadi 7.5 cal/cm²
 - d. Bus LV-SWGR-01-3500A sebesar 80.18% dari 22.2 cal/cm² menjadi 4.4 cal/cm²

5.2 Saran

Dari pengerjaan Tugas Akhir ini diharapkan dilakukan pengembangan untuk beberapa hal sebagai berikut:

1. Standarisasi *gap* dan *work distance* pada masing-masing bus di sistem kelistrikan Plant CPA JOB-PPEJ agar memenuhi standar IEEE 1584-2002.
2. ZSI merupakan teknik pengurangan insiden energi pada sistem kelistrikan tegangan rendah. Pengembangan selanjutnya ZSI dapat dikombinasikan dengan rele khusus sehingga tidak hanya dapat mengurangi *Arc Flash* pada tegangan rendah namun juga pada tegangan menengah dan tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lane, Jhon PE, "Arc Flash Hazard Analysis" Electrical Safety Engineer, AVO Training Institute.
- [2] Vajko, Rob., "The Basic Arc Flash Protection", © National Safety, Inc, 2008.
- [3] IEEE Std. 1584-2002., "IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 2002.
- [4] Albert Marroquin, "Evaluating NFPA 70E Arc Flash Hazard Category Tables", Electrical Product & Solutions, September 2007
- [5] Burn Injury facts, "Arc Flash / Blast Hazard Prevention". Report #86 1-2006, April 2006,
- [6] Antony C.Parsons, W. Blane Leuschner, and Kevin X.Jiang., "Simplified Arc Flash Hazard Analysis Using Energy Boundary Curves." IEEE Transections on Industry Applications Vol.44 no.6, November/December 2008.
- [7] SPLN 52-3 : 1983, "Pola Pengaman Sistem Bagian Tiga, Sistem Distribusi 6 kV dan 20 kV", Perusahaan Umum Listrik Negara, Jakarta, Pasal 4, 1983
- [8] Wahyudi, R, "Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
- [9] Donna Lee Hodgson and David Shipp. *Arc-Flash Incident Energy Reduction Using Zone Selective Interlocking*, IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 3, May/June 2010.
- [10] Christopher G. Walker. *Arc-Flash Energy reduction techniques: Zone-Selective Interlocking and Energy-Reducing Maintenance Switching*, IEEE transactions on Industry, Vol. 49, No. 2, March/April 2013.
- [11] Gary H. Fox, PE. *Methods For Limiting Arc Flash Hazards While Maintaining System Selectivity*, IEEE transactions on Industry. 2010
- [12] M. Valdes, R. Narel, P. Hamer, B. Premierlani, and T. Papallo, "Zone based protection for low voltage systems; zone selective interlocking, bus differential and the single processor concept," in Proc. IEEE PCIC, 2007, pp. 1-10.
- [13] Marcelo E. Valdes, John J. Dougherty, "Advances in Protective Device Interlocking for Improved Protection and Selectivity", IEEE transactions on Industry, Vol. 50, No. 3, May/June 2014.

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Shahrizal Erlangga dan biasa dipanggil Ichal. Lahir di Kota Pahlawan Surabaya pada tanggal 14 Juni 1991. Penulis mengawali pendidikan Sekolah dasar di SD Al-Azhar di Jakarta selama 6 tahun, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Al-Azhar Pusat di Jakarta selama 3 tahun, serta menempuh pendidikan di SMAN Al-Azhar 01 di Jakarta selama 3 tahun. Setelah lulus dari SMA, Penulis melanjutkan kuliah Program Diploma 3 (D3) jurusan Teknik Elektronika Industri di Politeknik Negeri Jakarta (PNJ) selama 3 tahun dan lulus tahun 2012. Setelah menyelesaikan program Diploma 3, Penulis melanjutkan kuliah Program Sarjana Lintas Jalur (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah Penulis aktif mengikuti seminar dan pelatihan. Jika ada keperluan bisa menghubungi di email *e.shahrizal14@gmail.com*

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan